

# 蓄能型振荡热管太阳能集热器性能研究

高旭娜<sup>1</sup>, 吴 薇<sup>1,2</sup>, 戴苏洲<sup>1</sup>, 王晓宇<sup>1</sup>, 孟志军<sup>1</sup>, 刘鹏鹏<sup>1</sup>

(1.南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

(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 210042)

[摘要] 本文设计了一种蓄能型振荡热管太阳能集热器, 将其应用在蓄能型振荡热管太阳能热泵系统中, 实现太阳能分季节全天候利用, 提高能源利用率。使用 Gambit 软件建立蓄能型振荡热管太阳能集热器的三维模型, 并利用 Fluent 软件对蓄能型振荡热管太阳能集热器中相变材料的蓄热过程进行了模拟研究, 得到不同集热器结构参数、集热器内蓄能材料、太阳辐射强度、外界换热条件等对其温度场、液化率等的影响。根据模拟结果, 振荡热管间距选 17 mm, 真空管后增设金属反射板, 集热管内采用复合相变材料, 夏季利用高温相变材料蓄热直接加热水, 冬季利用低温相变材料给热泵蒸发器供热, 从而提高系统整体性能。

[关键词] 太阳能集热器, 振荡热管, 相变材料, 温度场

[中图分类号] TK519 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2017)01-0048-10

## Performance Research of Solar Collector with Energy Storage and Oscillating Heat Pipe

Gao Xuna<sup>1</sup>, Wu Wei<sup>1,2</sup>, Dai Suzhou<sup>1</sup>, Wang Xiaoyu<sup>1</sup>, Meng Zhijun<sup>1</sup>, Liu Pengpeng<sup>1</sup>

(1.School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2.Engineering Laboratory for Energy System Process Conversion and Emission Reduction Technology of Jiangsu Province, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** A solar collector with energy storage and oscillating heat pipe is designed and applied to solar heat pump system. All-weather use can be realized and energy efficiency can be increased. The software Gambit is used to build 3d model of solar collector with energy storage and oscillating heat pipe. Numerical simulation of the phase change materials in solar collector is calculated by the software FLUENT. Influences of different structural parameters, phase change materials, solar radiation intensity and boundary conditions on the temperature field and liquefied ratio are obtained. According to the simulation results, the space between Oscillating heat pipes is 17 mm. Metal reflection plate is after vacuum tube. Composite phase change material is adopted in the heat collecting plate. In summer, hot water is directly heated by high temperature phase change material, and low temperature phase change material is used to supply heat for heat pump evaporator in winter, so the whole performance of the system is improved.

**Key words:** solar collector, oscillating heat pipe, phase change materials, temperature field

随着经济的快速发展,我国对能源的需求越来越大,大量使用的化石能源对空气质量造成极大破坏。太阳能作为一种无污染可再生能源,得到了越来越多的发展与应用。由于太阳能比较分散,必须设法把它集中起来,太阳能集热器是利用太阳辐射吸收材料的光热效应,将太阳辐射能转变为热能并向传热工质传递热量的特殊集热装置,是各种利用太阳能装置的关键部分。为了减少集热器的热损失,提高集热温度,20世纪70年代研制成功了真空集热管<sup>[1]</sup>。

国内外很多学者对太阳能真空管集热器进行了实验研究,有从制备方法和稳定性等方面进行吸收涂层的研究<sup>[2]</sup>,有对热性能评价方法进行研究,发现热延迟常数比时间常数能更好地反映真空管集热器的热性能<sup>[3]</sup>,有在真空管集热器中添加相变蓄能材料,然后供热给水箱蓄热,发现太阳辐射强度和初

收稿日期:2016-07-22.

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基金(JPKLST201503)。

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

始水温对系统性能有影响<sup>[4]</sup>,结果都表明真空管集热器具有广阔的应用前景.而对于太阳能真空管集热器的模拟研究,学者们主要是对模拟的精度和导热性能进行了加强.李满峰等<sup>[5]</sup>为了解决普通太阳能集热器仿真模拟中大量假设引起的误差偏大问题,引入了遗传神经网络的模型,对集热器进行了模拟,提高了太阳能集热器的仿真精度.袁颖利等<sup>[6]</sup>对一种新型的内插式真空管空气集热器进行了模拟,发现夏季工况下整体集热效率较高,且总体热损系数较小,模拟结果与实验相吻合.李志永等<sup>[7]</sup>建立了全玻璃真空管集热器仿真模型,全玻璃真空管集热器的联集管内的传热方式为以强制对流为主,而真空管内的传热方式则以自然对流为主,最终结果表明模型精度较高,适应性好.王志峰<sup>[8]</sup>对均匀热流条件下插管提热系统的管内流动与换热进行了三维稳态数值模拟,确定了插管长度对管内流场温度的影响. Kim H<sup>[9]</sup>等在 U 型管内采用纳米材料作为传热介质,结果表明在水中增加纳米材料可以提升水的导热系数,从而提升集热器集热效率.

由于太阳能的间歇性、不稳定性以及波动性,太阳能集热器在夜间及连续阴雨天无法有效地工作,将太阳能集热器与相变蓄能技术结合起来,能够很好地改善集热器不能连续运行的缺点.崔海亭<sup>[10]</sup>等建立了相变蓄热器的蓄热模型,采用添加膨胀石墨后的石蜡作为相变材料,对多管排列套管和同心套管两种不同的装置进行了模拟,结果表明多管排列模型比同心套管模型的蓄热能力更强,合理地增加套管蓄热器内管的数量,可以提高换热效率.该模型使用独立蓄能装置,未能充分利用真空管内的蓄热空间.

本文设计了一种蓄能型振荡热管太阳能集热器,并将其应用在蓄能型太阳能热泵热水系统中.如图 1(a)所示,系统可根据太阳辐射强度切换运行模式,可实现太阳能分季节全天候利用,提高能源利用率.利用 Fluent 软件对蓄能型振荡热管太阳能集热器中相变材料的蓄热过程进行了模拟研究,并根据结论对其做出了一系列优化设计.

## 1 蓄能型振荡热管太阳能集热器结构

蓄能型振荡热管太阳能集热器将太阳能集热器、相变蓄能容器、振荡热管集于一体,如图 1(b)所示.振荡热管的蒸发段以 U 形管形式布置在太阳能真空集热管内,蓄能材料填充在振荡热管的蒸发段与太阳能真空集热管之间,通过相变材料储存太阳能至夜间或连续阴雨天的使用,对太阳能实现移峰填谷.蓄能型振荡热管太阳能集热器是蓄能型太阳能热泵热水系统的核心部件,集热器中相变材料的蓄能过程直接影响到集热器的集热效率和系统的整体性能.

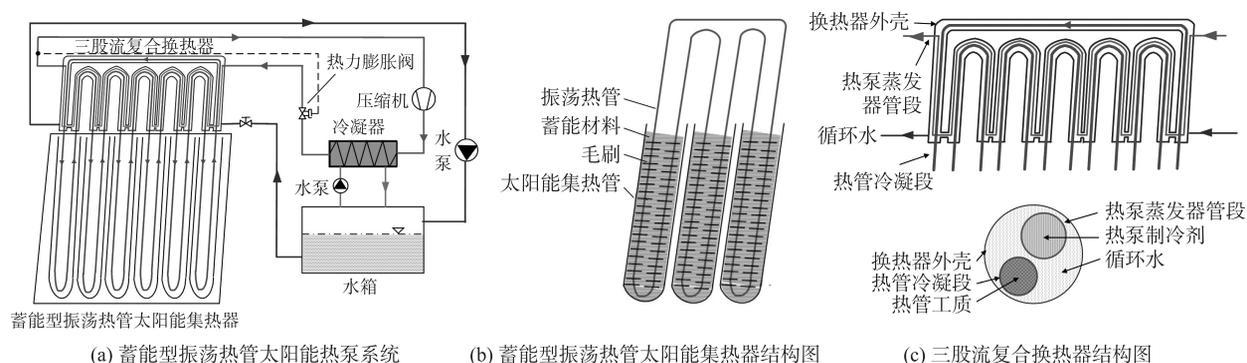


图 1 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of system

## 2 模型的建立

### 2.1 物理模型

根据图 1(b)建立太阳能集热器的物理模型,内管是振荡热管,外管是真空集热管,之间充灌相变蓄能材料.以真空管与 U 型振荡热管之间的相变材料为研究对象,建立太阳能集热器模型,研究相变材料的相变蓄能特性.真空管外径为 58 mm,内径为 47 mm,长为 1.6 m,外管透射率为 0.91,吸收率为 0.93,发射率为 0.06.真空管是硼硅玻璃,密度为 2 230 kg/m<sup>3</sup>,比热为 900 J/(kg·K),导热系数为 1.2W/(m·K).振荡热管在真空管内的长度为 1.2m,管径为 4mm.相变蓄能材料分别选石蜡或癸酸,物性参数如表 1 所示.

表 1 蓄能材料物性参数表  
Table 1 Property parameters of the energy storage materials

名称	相变温度/°C	比热/(kJ/(kg·K))		密度/(kg·m <sup>-3</sup> )		相变潜热/(J·g <sup>-1</sup> )
		固态	液态	固态	液态	
癸酸	32	1.95	1.72	1 004	878	152
石蜡	48	3	3	912	769	234

## 2.2 数学模型

利用 fluent 软件对蓄能型振荡热管太阳能集热器内相变材料蓄热过程进行模型,数值计算中作出以下假设<sup>[11]</sup>:

- (1) 真空管底部和真空管与换热器的接触面都是绝热的;
- (2) 相变蓄能材料在相变过程中不存在对流换热;
- (3) 忽略相变材料相变时的体积变化;
- (4) 假设相变材料为纯物质,无过冷和性能衰减现象发生;
- (5) 相变材料固、液两相比热、导热系数为常数,不随温度发生改变.

在 Fluent 软件中,使用 Solidification/Melting 模型,该模型是焓法模型. 以焓和温度同时作为因变量,在固相、液相和两相区建立一个统一的能量方程,由数值方法计算出整个区域的焓分布,以此来确定两相界面. 控制方程如下<sup>[11]</sup>:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = k \nabla^2 T. \tag{1}$$

式中,

$$T - T_m = \begin{cases} (h - h_s)/c_s, \\ 0, \\ (h - h_l)/c_l, \end{cases} \quad (\rho, k) = \begin{cases} (\rho_s, k_s), \\ (\rho_l, k_l). \end{cases}$$

式中,  $h_s$  和  $h_l$  分别为固相和液相的饱和焓,  $c_s$  和  $c_l$  分别为固相和液相的比热,  $T_m$  为相变材料平均温度,  $\rho_s$  和  $\rho_l$  分别为固相和液相的密度,  $k_s$  和  $k_l$  分别为固相和液相的导热系数.

## 3 Fluent 参数设置

蓄能型振荡热管太阳能集热器中,振荡热管的蒸发段以 U 形管形式布置在太阳能真空集热管内,蓄能材料填充在振荡热管的蒸发段与太阳能真空集热管之间. 使用 Gambit 作为前处理软件,构建振荡热管间距分别取 24 mm 和 17 mm 时蓄能型振荡热管太阳能集热器模型.

将不同结构参数的蓄能型振荡热管太阳能集热器模型导入 Fluent 中,使用 Solidification/Melting 模型,在蓄能型振荡热管太阳能集热器这个特殊的传热单元内,通过建立三维网格,基于焓法模型建立能量方程、连续性方程和动量方程,设置不同的相变材料物性参数,设置不同的太阳辐射强度,采用不同的边界条件(背阴面边界条件为对流换热或绝热),对集热器的性能进行分析研究,对比不同蓄能材料、太阳辐射强度、蓄能型振荡热管太阳能集热器结构参数、外界换热条件等对其温度场、液化率等的影响规律. 其中,加权平均温度准确定义为面积加权平均温度,其值是所有网格面上的温度与对应网格面的面积乘积之和除以总面积;加权平均液化率准确定义为面积加权平均液化率,其值是所有网格面上的液化率与对应网格面的面积乘积之和除以总面积.

## 4 数值模拟结果与分析

研究了不同的振荡热管结构、相变材料、太阳辐射强度和真空管外部传热情况对蓄能型振荡热管太阳能集热器内相变材料蓄热过程的影响,并根据结果对集热器进行了优化,从而提高蓄能型振荡热管太阳能集热器的集热效率和蓄能型太阳能热泵热水系统的整体性能.

### 4.1 振荡热管结构的变化

#### 4.1.1 边界条件设定

图 2 为振荡热管间距为 24 mm 和 17 mm 时不同时刻真空管内相变材料的温度场. 此时模拟中边界条

件设置为:相变材料为 48 石蜡;集热器真空管向阳面设置为恒热流,根据南京地区夏季气象条件模拟热流量为  $800 \text{ W/m}^2$ ;集热器真空管背阴面设为绝热;U 型振荡热管外壁面设置为恒壁温取值  $288 \text{ K}$ 。

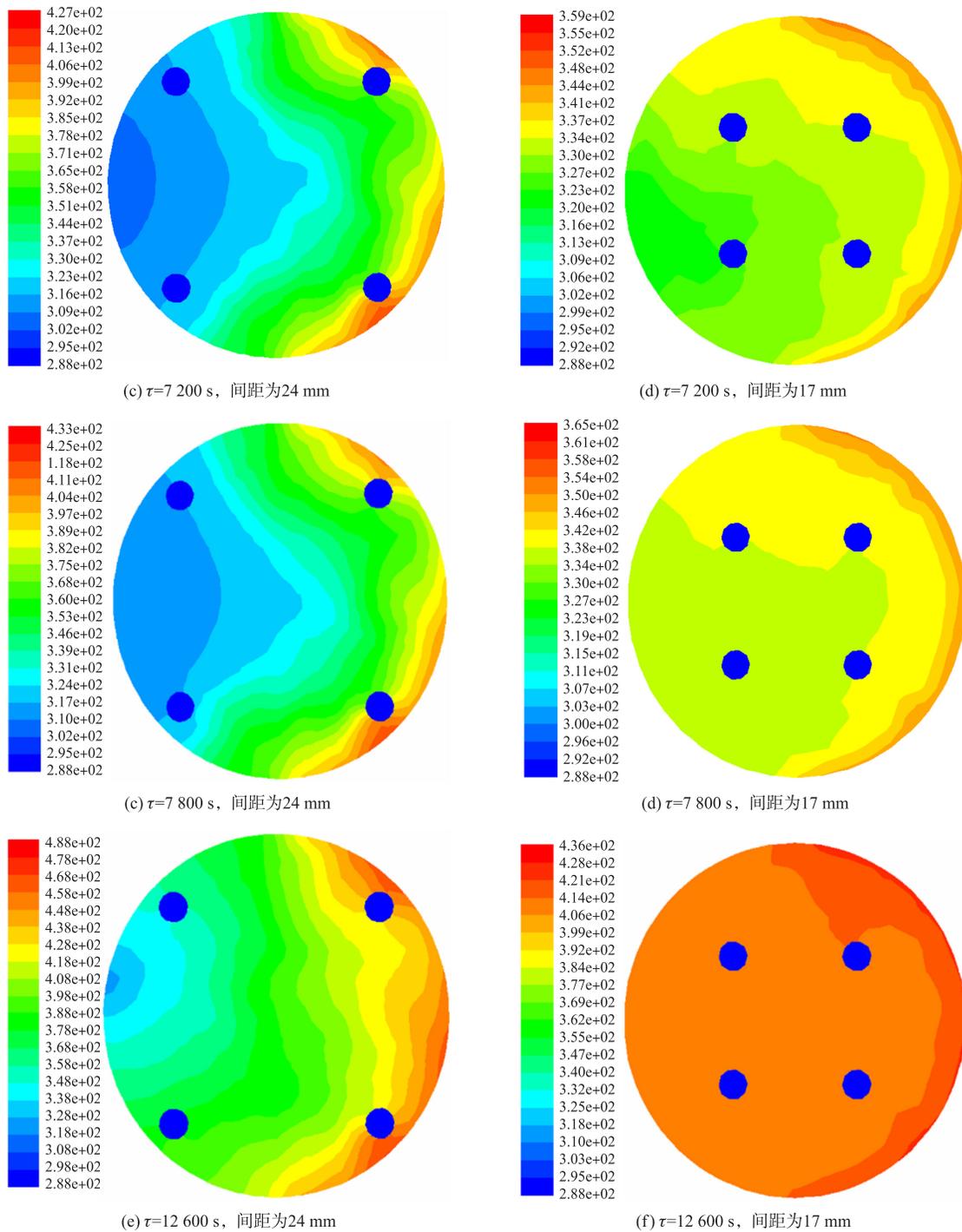


图 2 不同振荡热管间距时相变材料不同时刻的温度示意图

Fig. 2 Temperature diagram of phase change material at different moments when oscillating heat pipe spacing was different

#### 4.1.2 振荡热管结构变化的影响

从图 2 可以清晰地看出:向阳面圆周处石蜡吸收热量后迅速熔化,温度越来越高,由向阳面圆周处向内层温度逐步递减。当  $\tau=7\ 200 \text{ s}$  时,振荡热管间距为  $17 \text{ mm}$  的集热器,背阴面最低温度已经达到  $323 \text{ K}$ ,高于石蜡的相变温度  $321 \text{ K}$ ,此时整个真空管内石蜡已全部熔化为液态;而振荡热管间距为  $24 \text{ mm}$  的集热器,背阴面温度仅  $302 \text{ K}$ 。  $\tau=7\ 800 \text{ s}$  时,振荡热管间距为  $17 \text{ mm}$  的集热器,背阴面最低温度已经达到  $334 \text{ K}$ ,石蜡以显热储存热量;而振荡热管间距为  $24 \text{ mm}$  的集热器,背阴面温度仅  $310 \text{ K}$ 。当  $\tau=12\ 600 \text{ s}$  时,振荡热管间距为  $24 \text{ mm}$  的集热器背阴面最低温度才达到  $328 \text{ K}$ ,此时集热器内石蜡全部熔化。

采用不同的振荡热管间距结构参数时,由蓄能型振荡热管太阳能集热器内蓄能过程温度场可见,振荡热管间距为 24 mm 时集热器内相变材料全部液化所需时间为 3.5 h,而振荡热管间距为 17 mm 时集热器内相变材料能更快地全部液化,所需时间仅为 2 h,其性能更优.这是因为振荡热管间距为 17 mm 时,靠近真空管外壁的相变材料多,向阳面得到热量后液化,液化区域更大,对流换热更强烈.因此蓄能型振荡热管太阳能集热器及蓄能型太阳能热泵热水系统本系统中采用振荡热管间距为 17 mm 的结构形式.

### 4.2 相变材料的不同

#### 4.2.1 边界条件设定

图 3 为充灌 48 石蜡或癸酸时不同时刻真空管内相变材料的温度场.边界条件设置为:振荡热管间距为 17 mm;集热器真空管向阳面设置为恒热流,根据南京地区冬季气象条件模拟热流量为  $300 \text{ W/m}^2$ ;集热器真空管背阴面设为绝热;U 型振荡热管外壁面设置为恒壁温取值 288 K.

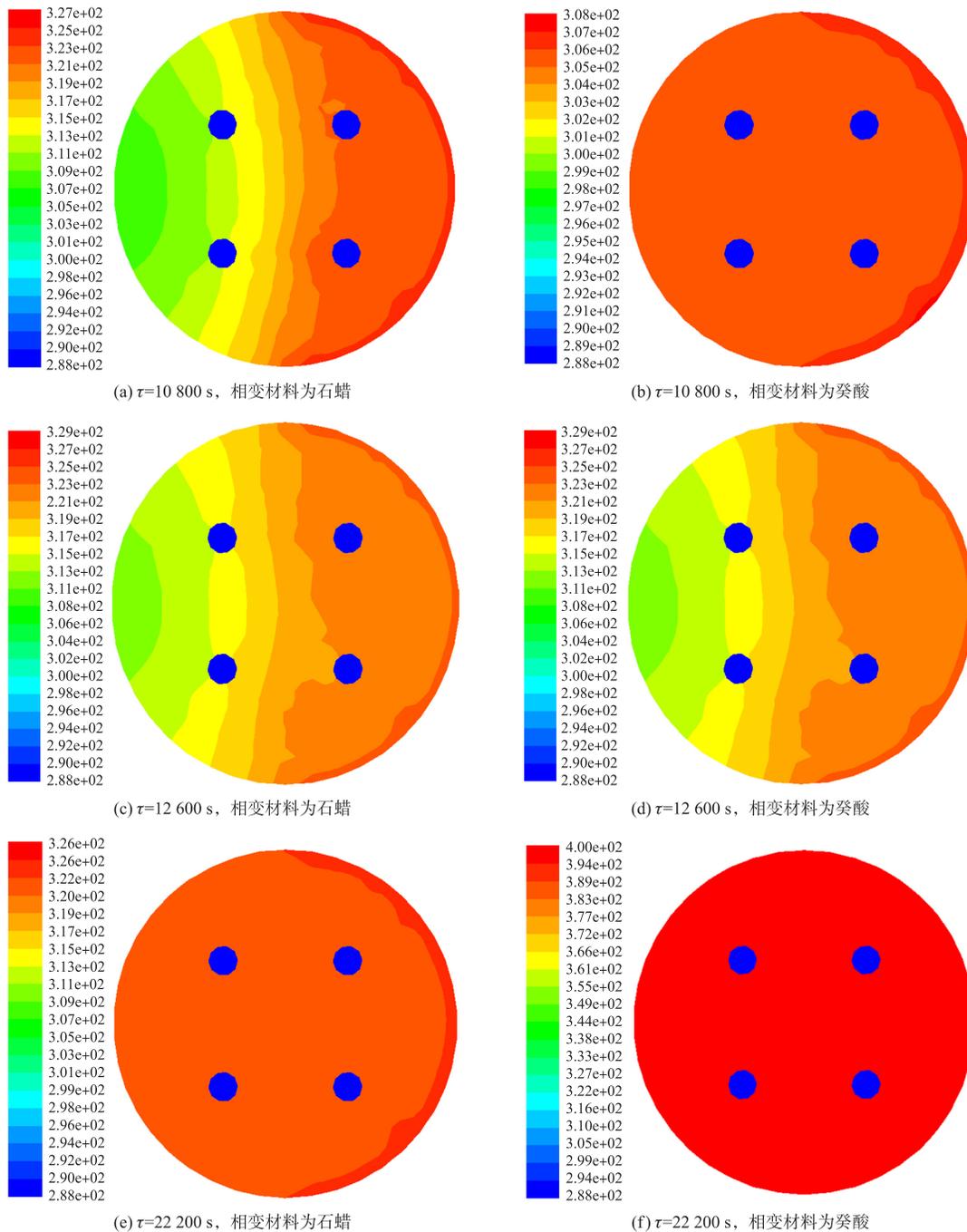


图 3 充灌不同相变材料时相变材料不同时刻的温度示意图

Fig. 3 Temperature diagram of phase change material at different moments when filling different phase change materials

#### 4.2.2 相变材料的影响

如图3所示,  $\tau = 10\ 800\ \text{s}$  时, 充灌石蜡的集热器背阴面最低温度仅为  $309\ \text{K}$ , 大部分石蜡还未达到相变温度; 而充灌癸酸的集热器背阴面最低温度为  $305\ \text{K}$ , 已经达到相变温度  $32\ \text{℃}$  此时整个真空管内癸酸已全部熔化为液态.  $\tau = 12\ 600\ \text{s}$  时, 充灌癸酸的集热器, 背阴面最低温度达到  $311\ \text{K}$ , 癸酸开始以显热储存热量; 而充灌石蜡的集热器, 背阴面最低温度仅  $313\ \text{K}$ , 未达到石蜡相变温度  $48\ \text{℃}$ .  $\tau = 22\ 200\ \text{s}$  时, 充灌石蜡的集热器背阴面温度达到  $322\ \text{K}$ , 此时整个真空管内石蜡全部熔化.

充灌不同相变材料时的加权平均温度曲线和液化率曲线如图4所示. 充灌石蜡时,  $\tau = 1\ 860\ \text{s}$  之前始终处于显热升温过程, 温升较快, 液化率几乎为0. 当  $\tau = 1\ 860\ \text{s}$  时, 向阳面的相变材料开始出现液化, 液化率逐步增加, 直至  $\tau = 15\ 120\ \text{s}$  液化率达到  $50\%$ , 此时加权平均温度达到  $319\ \text{K}$ , 处于相变过程的石蜡温度不再升高, 已液化的石蜡继续吸收显热温度升高, 因此整个圆周面的加权平均温度升高变缓. 当  $\tau = 22\ 200\ \text{s}$  整个圆周面的加权平均液化率达到  $100\%$ . 充灌癸酸时,  $\tau = 600\ \text{s}$  之前始终处于显热升温过程, 液化率几乎为0. 当  $\tau = 600\ \text{s}$  时, 向阳面的相变材料开始出现液化, 直至  $\tau = 7\ 380\ \text{s}$  液化率达到  $50\%$ , 此时加权平均温度达到  $304\ \text{K}$ . 当  $\tau = 12\ 060\ \text{s}$  整个圆周面的加权平均液化率达到  $100\%$ .

从图4中可见, 液化率达到  $50\%$  后, 充灌石蜡和充灌癸酸的集热器内加权平均温度均出现了变化平缓甚至下降的趋势. 由非稳态传热过程特性可知, 这是因为在太阳辐射强度  $300\ \text{W}/\text{m}^2$  下, 通过向阳面已液化的相变材料传递给内层未相变蓄能材料的热流密度, 不足以提供其液化所需的热量, 已液化的相变材料放出部分显热, 因此整个圆周面的加权平均温度出现平缓 and 降低.

充灌不同相变材料时, 由蓄能型振荡热管太阳能集热器内蓄能过程温度场可见, 南京地区冬季  $300\ \text{W}/\text{m}^2$  的太阳辐射强度下, 集热器内石蜡全部液化所需的时间为  $6\ \text{时}\ 10\ \text{分}$ , 而集热器内癸酸全部液化所需的时间为  $3\ \text{时}\ 21\ \text{分}$ , 比石蜡所需时间短, 所以在冬季太阳辐射强度较低的情况下, 充灌癸酸的集热器更容易达到相变蓄能的目的. 这是因为癸酸的相变潜热为  $152\ \text{kJ}/\text{kg}$ , 小于石蜡的相变潜热  $234\ \text{kJ}/\text{kg}$ , 因而得到相同热量时癸酸更容易液化, 但夜间释热过程癸酸相变释放出来的热量相对于石蜡会更少. 在蒸发器侧所需热量相同时, 充灌癸酸需要的真空管管数更多, 且癸酸具有腐蚀性<sup>[12]</sup>, 因此蓄能型振荡热管太阳能集热器及蓄能型太阳能热泵热水系统中采用石蜡作为相变蓄能材料.

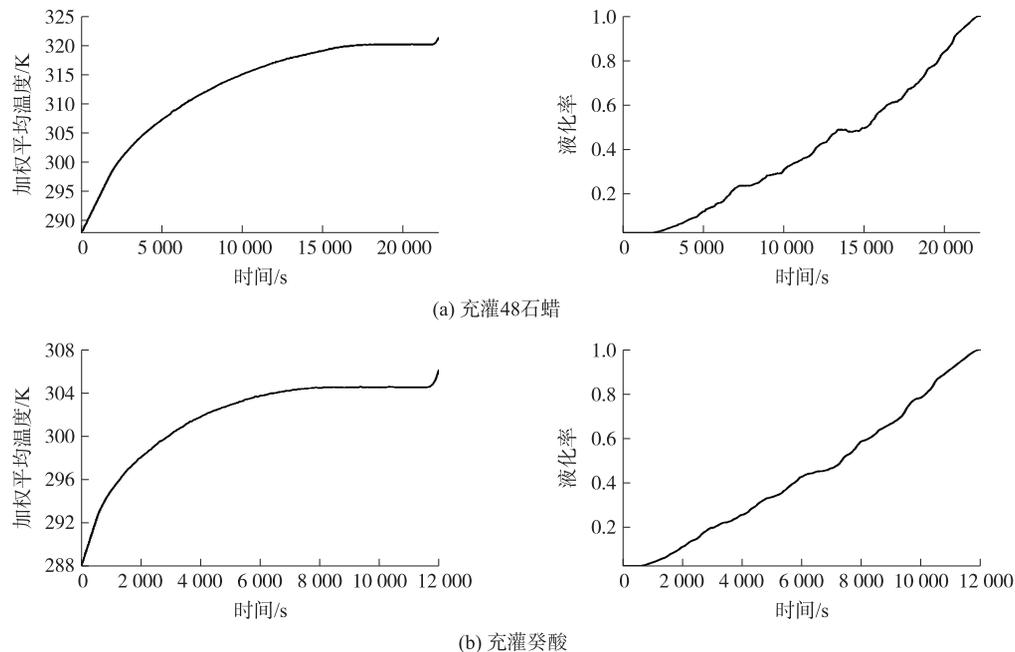


图4 充灌不同相变材料时加权平均温度曲线和液化率曲线

Fig. 4 Weighted average temperature curve and liquefaction rate curve when filling different phase change materials

### 4.3 太阳辐射的不同强度

#### 4.3.1 边界条件的设定

根据南京地区夏季和冬季气象资料太阳辐射强度分别取  $300\ \text{W}/\text{m}^2$  和  $800\ \text{W}/\text{m}^2$ , 图5为不同太阳辐射

强度时不同时刻真空管内相变材料的温度场. 此时模拟中其他边界条件设置为: 振荡热管间距为 17 mm; 相变材料为 48 石蜡; 真空管背阴面设为绝热; U 型振荡热管外壁面设置为恒壁温取值 288 K.

#### 4.3.2 太阳辐射强度的影响

如图 5 所示:  $\tau=7\ 200\ \text{s}$  时, 太阳辐射强度为  $800\ \text{W}/\text{m}^2$  的集热器背阴面最低温度达到 323 K, 石蜡达到相变温度 321 K; 太阳辐射强度为  $300\ \text{W}/\text{m}^2$  的集热器背阴面最低温度仅为 299 K.  $\tau=9\ 000\ \text{s}$  时, 太阳辐射强度为  $800\ \text{W}/\text{m}^2$  的集热器背阴面最低温度已经达到 358 K, 此时整个真空管内石蜡已全部熔化为液态, 并以显热储存热量; 太阳辐射强度为  $300\ \text{W}/\text{m}^2$  的集热器背阴面最低温度仅为 301 K.  $\tau=22\ 200\ \text{s}$  时, 太阳辐射强度为  $300\ \text{W}/\text{m}^2$  的集热器背阴面最低温度才达到 322 K, 此时整个真空管内石蜡全部熔化.

对于使用同一种相变材料 48 石蜡时, 南京地区冬季  $300\ \text{W}/\text{m}^2$  的太阳辐射强度下, 集热器内石蜡全部相变所需的时间为 6 时 10 分, 而夏季  $800\ \text{W}/\text{m}^2$  的太阳辐射强度下, 集热器内石蜡全部相变所需时间仅为 2 h, 性能更优. 夏季时经过 2.5 h 的太阳辐射, 集热管内温度可达到  $85\ \text{C}$ , 冬季时经过 6 时 10 分的太阳辐射, 集热管内温度可达到  $49\ \text{C}$ . 鉴于此, 蓄能型太阳能热泵热水系统的集热器内充灌复合相变材料, 夏季时利用高温相变材料蓄热, 通过振荡热管直接加热热水; 冬季时利用低温相变材料蓄热来加热热泵系统蒸发器, 开启热泵循环加热热水, 从而提高系统整体性能.

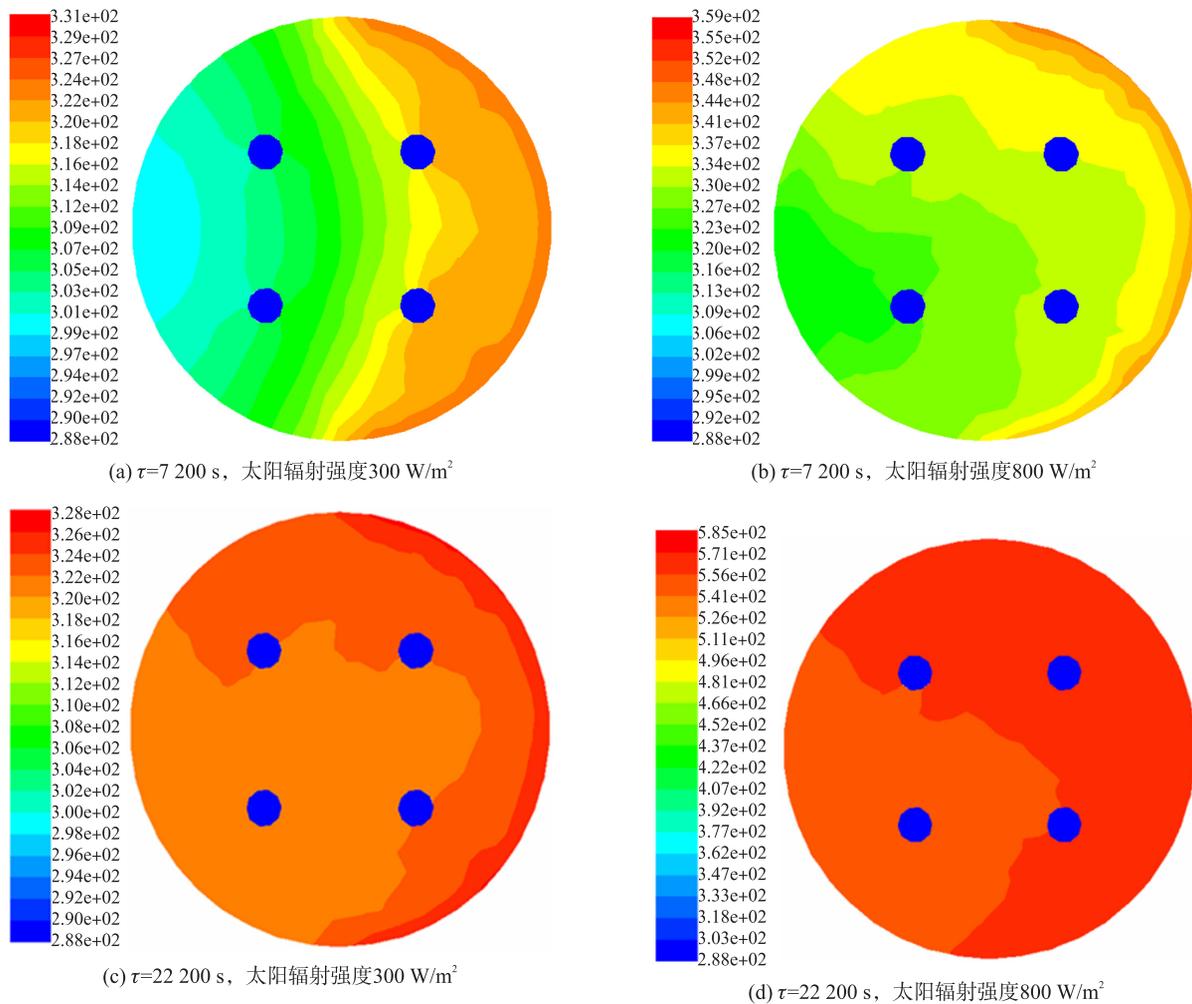


图 5 不同太阳辐射强度下相变材料不同时刻的温度示意图

Fig. 5 Temperature diagram of phase change materials at different time under different solar radiation intensity

### 4.4 真空管背阴面的传热

#### 4.4.1 边界条件设定

图 6 为真空管外背阴面不同边界条件: 绝热和对流换热系数为  $10\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 由此可得不同时刻真空管内相变材料的温度场. 此时模拟中其他条件设置为: 振荡热管间距为 17 mm; 相变材料为 48 石蜡; 真

空管向阳面设置为恒热流,根据南京地区夏季气象条件模拟热流量为  $800 \text{ W/m}^2$ ;外界环境温度取  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ; U 型振荡热管外壁面设置为恒壁温取值  $288 \text{ K}$ .

#### 4.4.2 真空管背阴面传热情况的影响

从图 6 中可以看出:当真空管背阴面绝热时,  $\tau=7\ 200 \text{ s}$  时,背阴面最低温度已经达到  $320 \text{ K}$ ,接近石蜡的相变温度  $321 \text{ K}$ ;  $\tau=9\ 000 \text{ s}$  时,背阴面最低温度已经达到  $358 \text{ K}$  ( $85 \text{ }^\circ\text{C}$ ),此时整个真空管内石蜡已全部熔化,并以显热储存热量.而真空管背阴面存在对流换热时,  $\tau=7\ 200 \text{ s}$  时,背阴面最低温度仅为  $301 \text{ K}$ ;  $\tau=9\ 000 \text{ s}$  时,背阴面温度达到  $329 \text{ K}$ ,此时集热器内石蜡已全部熔化.

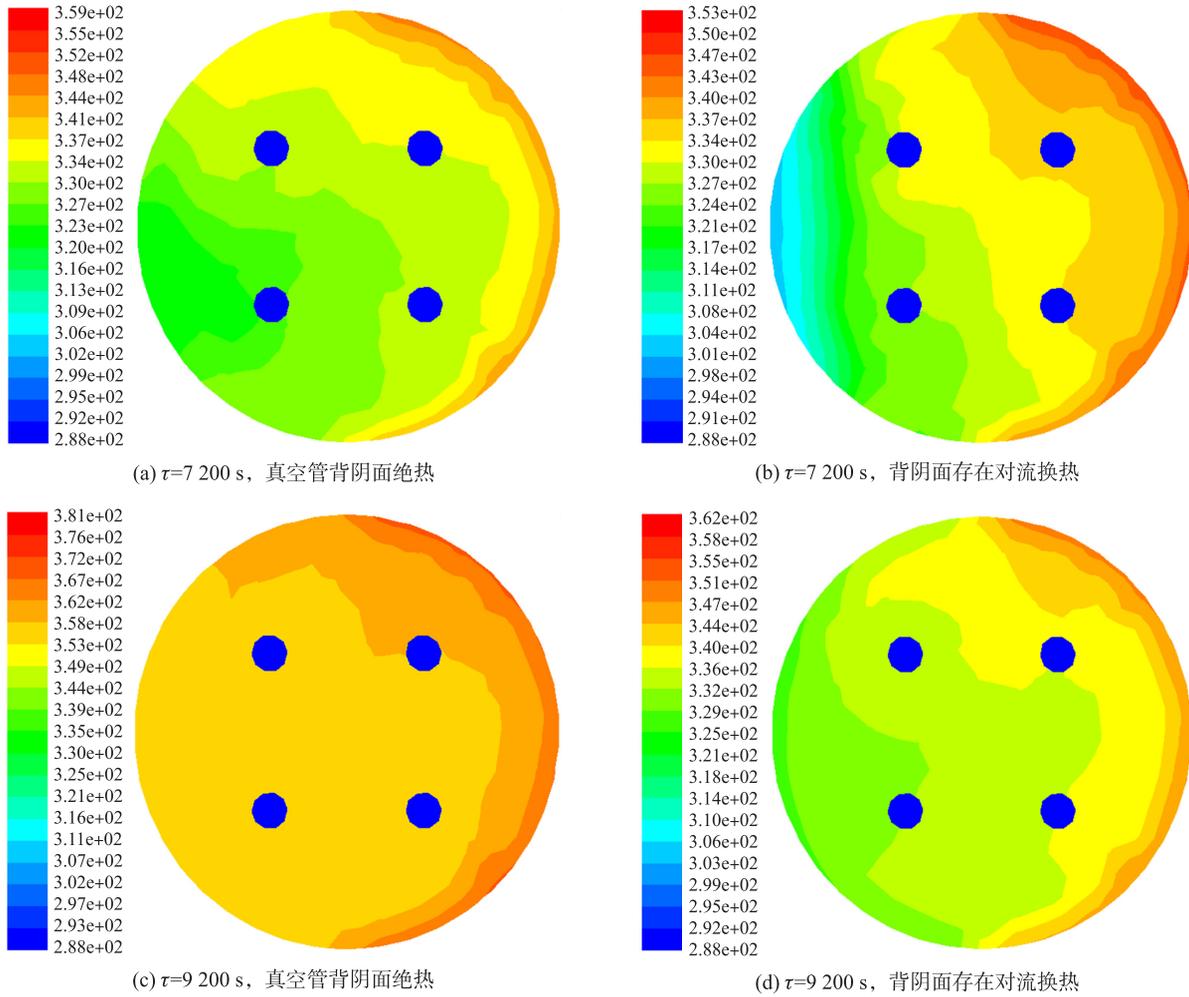


图 6 不同传热条件下相变材料不同时刻的温度示意图

Fig. 6 Temperature diagram of phase change materials at different time under different heat transfer conditions

真空管背阴面存在对流换热时,所引起热损失为

$$\Phi = Ah\Delta t = Ah(t_c - t_a). \quad (2)$$

式中,  $h$  是对流换热系数,  $A$  是背部对流换热面积,  $t_c$  和  $t_a$  分别是真空管表面温度和外界环境温度.

对流时外界环境温度为  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , 表面传热系数为  $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 实验测得真空管外表面温度与环境温度差值. 若以  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  计算, 则单根真空管背阴面对流换热引起的热损失为  $1.46 \text{ W}$ .

如果在真空管后设置金属铝板, 则铝板对真空管反射的热辐射为

$$\Phi_{1,2} = \frac{E_1 - E_2}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} = \frac{C_0 \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - C_0 \left( \frac{T_2}{100} \right)^4}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}. \quad (3)$$

式中,  $\Phi_{1,2}$  是铝板对真空管的热辐射,  $E_1$  和  $E_2$  分别是铝板辐射力和真空管辐射力,  $C_0$  是黑体辐射常数, 为

$5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ .  $T_1$  是铝板温度,取  $296 \text{ K}$ .  $T_2$  是真空管表面温度,取  $288.2 \text{ K}$ .  $X_{1,2}$  是铝板对真空管的角系数为  $0.9$ ,  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  分别是铝板发射率为  $0.3^{[13]}$  和真空管的发射率为  $0.06^{[14]}$ ,  $A_1$  和  $A_2$  分别代表铝板面积为  $0.16 \text{ m}^2$  和单真空管对应铝板面积为  $0.146 \text{ m}^2$ .

计算可得铝板与真空管背阴面辐射换热量为  $1.82 \text{ W}$ ,大于真空管背阴面对流换热损失,此时可认为真空管背阴面为绝热.

使用  $48$  石蜡作为相变材料,在  $800 \text{ W}/\text{m}^2$  的太阳辐射强度下,真空管背阴面为绝热时,相变材料全部液化需要  $2$  时  $5$  分. 而真空管背阴面为对流换热条件下,当外界环境温度为  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,其对流换热系数为  $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  时,相变材料液化需要  $2$  时  $25$  分,比真空管背阴面为绝热时所需时间更多. 因此在将蓄能型振荡热管太阳能集热器应用于蓄能型太阳能热泵热水系统时,为了减少相变材料液化所需时间提高整体性能,在真空管后增设金属铝板.

## 5 结语

在蓄能型振荡热管太阳能集热器这个特殊的传热单元内,利用 Fluent 软件对相变材料的蓄热过程进行动态模拟,得到不同蓄能型振荡热管太阳能集热器结构参数、集热器内相变材料、太阳辐射强度、外界换热条件等对其温度场、液化率等的影响. 并根据结论对蓄能型振荡热管太阳能集热器及蓄能型太阳能热泵热水系统做出了如下优化设计:

(1) 采用振荡热管间距较小的结构形式,集热管内相变材料液化更快. 虽然充灌癸酸的集热管内液化更快,但是考虑到癸酸具有腐蚀性,采用石蜡作为相变蓄能材料. 在真空管背阴面增设金属铝板,改善蓄能型振荡热管太阳能集热器的性能.

(2) 夏季经过  $2.5 \text{ h}$  太阳辐射后,集热管内相变温度高达  $85 \text{ }^\circ\text{C}$ ,而冬季经过  $6 \text{ h}$  的太阳辐射,集热管内温度仅达到  $49 \text{ }^\circ\text{C}$ . 鉴于此,夏季利用高温相变材料蓄热直接加热热水,冬季利用低温相变材料给热泵蒸发器供热,从而提高系统整体性能.

### [参考文献] (References)

- [1] 李传统. 新能源与可再生能源技术[M]. 南京:东南大学出版社,2005:9.  
LI C T. New energy and renewable energy technology[M]. Nanjing:Southeast University Press,2005:9.(in Chinese)
- [2] 李建昌,侯雪艳,王紫瑄,等. 真空管式太阳能集热器研究最新进展[J]. 真空科学与技术学报,2012,32(10):943-950.  
LI J C, HOU X Y, WANG Z X, et al. Latest development of vacuum tube solar collectors[J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2012, 32(10):943-950.(in Chinese)
- [3] 王志峰. 全玻璃真空管太阳能空气集热器热性能试验方法研究[J]. 太阳能学报,2001,22(2):141-147.  
WANG Z F. Study on measurement of thermal performance of all-glass evacuated tubular solar air heater[J]. Acta energiae solaris sinica, 2001, 22(2):141-147.(in Chinese)
- [4] XUE H S. Experimental investigation of a domestic solar water heater with solar collector coupled phase-change energy storage[J]. Renewable energy, 2016, 86:257-261.
- [5] 李满峰,李素萍,范波. 基于遗传神经网络的太阳能集热器仿真研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(5):126-130.  
LI M F, LI S P, FAN B, et al. Research on solar collector simulation based on genetic-BP algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(5):126-130.(in Chinese)
- [6] 袁颖利,李勇,代彦军,等. 内插式太阳能真空管空气集热器性能分析[J]. 太阳能学报,2010,31(6):703-708.  
YUAN Y L, LI Y, DAI Y J, et al. Analysis of thermal performance of evacuated tubular solar air collector with inserted tubes[J]. Acta energiae solaris sinica, 2010, 31(6):703-708.(in Chinese)
- [7] 李志永,陈超,张叶,等. 太阳能-相变蓄热-新风供暖系统仿真优化设计研究[J]. 太阳能学报,2012,33(5):852-859.  
LI Z Y, CHEN C, ZHANG Y, et al. Simulation optimization research on solar energy-phase change thermal storage-fresh air heating system[J]. Acta energiae solaris sinica, 2012, 33(5):852-859.(in Chinese)
- [8] 王志峰, SUN H W. 全玻璃真空管空气集热器管内流动与换热的数值模拟[J]. 太阳能学报,2001,22(1):35-39.  
WANG Z F, SUN H W. A numerical simulation on heat transfer and fluid flow in a glass tube of all-glass evacuated tubular solar air heater[J]. Acta energiae solaris sinica, 2001, 22(1):35-39.(in Chinese)

- [ 9 ] KIM H,HAM J,PARK C,et al. Theoretical investigation of the efficiency of a U-tube solar collector using various nanofluids[J]. Energy,2016,94( 3 ):497-507.
- [ 10 ] 崔海亭,周慧涛,蒋静智. 用于储存太阳能的相变蓄热器蓄热性能研究[J]. 可再生能源,2013,31( 12 ):17-20.  
CUI H T,ZHOU H T,JIANG J Z. Numerical simulation on heat storing performances of phase-change thermal storage for solar energy[J]. Renewable energy resources,2013,31( 12 ):17-20.(in Chinese)
- [ 11 ] 周慧涛. 太阳能供暖系统中相变蓄热器热性能研究[D]. 石家庄:河北科技大学,2014.  
ZHOU H T. Study on thermal performance of phase change heat sequitor in solar heating system[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology,2014.(in Chinese)
- [ 12 ] SHARMA A,TYAGI V V,CHEN C R,et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications[J]. Renewable and sustainable energy reviews,2009,13( 2 ):318-345.
- [ 13 ] 杨世铭. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1998.  
YANG S M. Heat transfer[M]. Beijing:Higher Education Press,1998.(in Chinese)
- [ 14 ] 王玲珑. 一体化太阳能蓄能/蒸发/集热器的研究[D]. 南京:南京师范大学,2014.  
WANG L L. Research on a solar energy storage/evaporator/collector[D]. Nanjing:Nanjing Normal University,2014.(in Chinese)

[ 责任编辑:陈 庆 ]