

# 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

夏曼<sup>1</sup>, 王晓宇<sup>1</sup>, 吴薇<sup>1,2</sup>, 黄金燕<sup>1</sup>, 秦芷萱<sup>1</sup>, 杨晨<sup>1</sup>, 廖扬颢<sup>1</sup>

(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]** 提出一种蓄能型内插热管式太阳能集热器, 在太阳能真空管和振荡热管蒸发段之间充灌相变材料, 提高集热器的瞬时集热效率. 利用 Gambit 软件建立内插热管式太阳能集热器的三维模型, 基于 FLUENT 软件的凝固/熔化模型, 以癸酸(CA)为相变材料进行模拟研究, 采用 Boussinesq 近似法对比分析了考虑浮升力前后的真空管内温度场分布、液化率、不同测点的温度曲线的变化, 探究了浮升力对集热器内蓄热/释热过程换热规律的影响. 结果表明, 相变材料熔化过程中浮升力起着至关重要的作用, 使得真空管内顶部的升温速度快于底部. 而凝固过程中浮升力的影响可以忽略不计. 蓄热过程中集热器内相变材料在轴向上的传热方式, 固态显热和相变蓄热阶段以导热为主, 液态显热蓄热时以对流传热为主, 而在径向上始终以导热为主.

**[关键词]** 内插热管式太阳能集热器, 相变储能, 癸酸, 浮升力, 数值模拟

**[中图分类号]** TK519 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2020)03-0001-08

## Study on Thermal Storage/Thermal Release Characteristics of Phase Change Materials in Solar Collector with Inserted Heat Pipe

Xia Man<sup>1</sup>, Wang Xiaoyu<sup>1</sup>, Wu Wei<sup>1,2</sup>, Huang Jinyan<sup>1</sup>,  
Qin Zhixuan<sup>1</sup>, Yang Chen<sup>1</sup>, Liao Yangsang<sup>1</sup>

(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 kind of energy storage type solar collector with inserted heat pipe is proposed, and the phase change material(PCM) is filled between the solar vacuum tube and the evaporation section of the oscillating heat pipe to improve the instantaneous collecting efficiency of the collector. In order to grasp the characteristics of phase change heat storage/release heat process in the collector, a three-dimensional model of a solar collector with inserted heat pipe is established by using Gambit software. Based on the solidification & melting model in FLUENT, the melting process of capric acid (CA) which is used as PCM is numerically simulated. The comparison and analysis of the vacuum tube considering natural convection are made by using Boussinesq approximation. Temperature distribution, liquefaction rate, and temperature change curves at different measurement point to explore the effect of buoyancy in the vacuum tube on the heat transfer flow mechanism during phase change energy storage. The results show that natural convection plays a vital role in the melting process of PCM, and that the temperature rises faster at the top of the vacuum tube than that at the bottom. The effect of buoyancy during the solidification process can be ignored. In the vacuum tube placed vertically, the heat transfer mode of the heat storage process in the axial direction, is mainly heat conduction at the solid sensible heat and the phase change heat storage stage, and at the liquid sensible heat storage stage is mainly convective heat transfer. In the radial direction, heat conduction is always the main factor.

**Key words:** solar collector with inserted heat pipe, phase change energy storage, capric acid, buoyancy, numerical simulation

收稿日期: 2020-03-25.

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@njjnu.edu.cn

当今太阳能热利用技术较普及,如何提升太阳能集热器的集热性能已成为太阳能热领域研究的重中之重. 热管因具有热量传输率高,灵活性好,结构简单等优点得到广泛应用<sup>[1]</sup>. 众多研究表明,将热管应用于太阳能集热器中可提高集热器的瞬时热效率<sup>[2-3]</sup>,减小平均热损失系数<sup>[4]</sup>,获得较高的集热温度<sup>[5]</sup>,使集热效率得以提升<sup>[6]</sup>. Dan 等<sup>[7]</sup>研究了 2 种不同类型的太阳能集热器,发现应用热管后这 2 种集热器的集热性能均得到提升.

但是太阳能的间歇性及波动性不利于能量的高效储存和利用,为了克服太阳能波动性的影响,研究者们从具有“移峰填谷”作用的蓄能技术入手<sup>[8]</sup>. Abdelsalam 等<sup>[9]</sup>研究发现在太阳能家用热水系统的水箱中采用相变材料蓄能可以减少约 40% 的储水量. Papadimitratos 等<sup>[10]</sup>在太阳能热水器的真空管内充灌相变材料,研究表明相变材料可以有效地将能量存储起来,在夜间或阴天当太阳能不足时向系统提供延迟热量.

研究相变传热的过程和机理有利于进一步提高能量的利用效率,主要有实验、模拟、实验和模拟相结合几种方法<sup>[11]</sup>. 考虑对流换热以及环境变化条件(太阳辐射和环境温度)的影响,Kant 等<sup>[12]</sup>建立了一种蓄能建筑砖的二维模型,对比分析了填充不同相变材料建筑砖的温度场分布情况,结果显示其中癸酸的性更优. Libeer 等<sup>[13]</sup>通过模拟实验研究了泡沫材料中相变材料的固液传热机理,研究表明由于浮升力引起的自然对流是纯相变材料熔化过程中的主要传热方式. 杨智舜等<sup>[14]</sup>应用焓值法分别对充填低温无机盐相变材料的二维和三维管壳式相变储能换热器模型的储/放热特性进行了模拟研究,采用 Boussinesq 近似法研究了液相区密度变化引起的浮升力的影响,结果表明在储热过程中浮升力发挥了重要作用,换热效率与液相区的运动状态直接相关,因此相变过程浮升力的影响不可忽略. 在相变过程的研究上,实验方法在实际操作中存在一些困难,而模拟方法可以克服实验的局限性,更精准地控制变量实现优化分析,有利于后续实验的开展.

本文提出了一种蓄能型内插热管式太阳能集热器,充灌癸酸作为蓄能材料. 利用 Gambit 软件建立内插热管式太阳能集热器的三维模型,采用模拟方法研究太阳能集热器内相变材料的蓄热/释热特性. 基于 FLUENT 软件,采用 Boussinesq 近似法,对比了考虑浮升力前后的真空管内温度场分布、液化率等变化情况,分析得到集热器内部浮升力对相变储能过程中换热流动特性的影响.

## 1 模型构建

### 1.1 物理模型

本文研究了一种内插热管式太阳能集热器<sup>[15]</sup>,如图 1 所示. 振荡热管的蒸发段以 2 根 U 形管的形式布置在太阳能真空管内,相变材料填充在振荡热管的蒸发段与太阳能真空管之间. 真空管接收太阳辐射,当太阳能充足时,其中的相变材料吸收热量开始蓄能,当太阳能不足时释放热量. 选用的真空管内径 47 mm,长为 1.6 m. 振荡热管长度为 1.2 m,管径为 4 mm,U 型振荡热管两管中心距为 17 mm,材料为紫铜. 所建立的物理模型如图 2 所示.

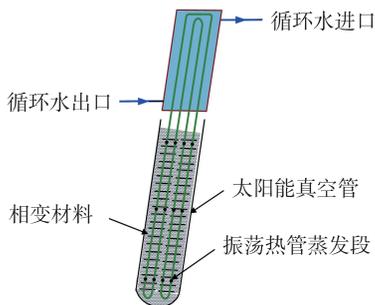


图 1 结构原理图

Fig. 1 Structural schematic diagram

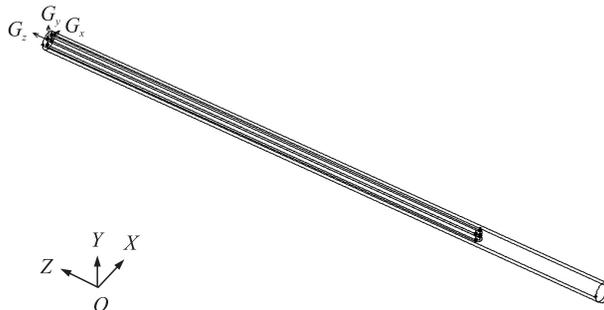


图 2 物理模型

Fig. 2 Physical model

### 1.2 数学模型

相变材料吸收热量后,在一定的恒温条件下由固态转为液态. 焓法通过对整个区域(包括固相区、液相区及两相糊状区)建立统一的守恒方程,根据焓的分布来界定相界面,可以很好地解决移动边界的问题.

相变过程中,由于材料的密度随温度变化,在重力及浮升力作用下,液相区域会发生自然对流.现做以下假设:

- (1) 相变材料除密度外常物性,且各项同性;
- (2) 液相区的自然对流是层流,且由 Navier-Stokes 方程控制;
- (3) 在考虑浮升力作用时,密度的变化满足 Boussinesq 近似法的条件;
- (4) 不考虑相变材料的过冷度;
- (5) 忽略相变材料的体积膨胀.

得到考虑浮升力的焓法模型,其控制方程如下.

(1) 连续性方程:

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

(2) 能量方程:

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

(3) 动量方程:

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

其中,  $x$  轴方向:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} + S_i. \quad (4)$$

$y$  轴方向:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} + S_i. \quad (5)$$

$z$  轴方向:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial z} + S_i. \quad (6)$$

且液化率:

$$\beta = \begin{cases} 0, & t < t_s, \\ \frac{t-t_s}{t_l-t_s}, & t_s < t < t_l, \\ 1, & t > t_l. \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\rho$  为传热流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  方向的速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $c$  为流体比热,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $t$  为温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $k$  为导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\nu$  为运动粘度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\tau$  为凝固时间,  $\text{s}$ ;  $\mu$  为动力粘度,  $(\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}^2$ ;  $S_i$  为动量修正项,用以修正密度变化产生的流动,  $(\text{kg} \cdot \text{m})/\text{s}$ ;  $t_l$  为材料的液相温度;  $t_s$  为材料的固相温度.

## 2 相变过程模拟

### 2.1 材料选择

癸酸属于脂肪酸,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、价格便宜等特性,广泛应用于低温太阳能热储存领域<sup>[16-17]</sup>.设置相变材料的物性参数,如表 1 所示.

表 1 相变材料的物性参数  
Table 1 Physical properties of PCM

名称	相变温度/ $^\circ\text{C}$	相变焓值/ $(\text{J}/\text{g})$	比热/ $(\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K}))$		密度/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$		导热系数/ $(\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$
			固态	液态	固态	液态	
癸酸	32.66	153.67	2.1	2.0	1 004	878	0.149

## 2.2 网格及参数设置

利用 Gambit 软件进行网格划分,综合考虑模拟精度和计算速度,经过独立性验证后选择网格尺寸为 1 mm,时间步长为 1 s,网格模型如图 3 所示.而如果将网格尺寸和时间步长分别改为 0.1 mm 和 0.1 s,发现计算结果相差均小于 0.1%,计算时间却增加了 10 倍以上.

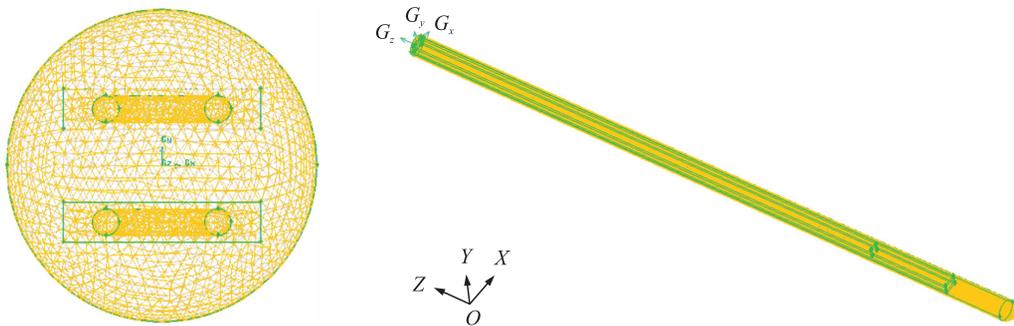


图 3 真空管集热器网格图

Fig. 3 Grid diagram of vacuum tube solar collector

在 Fluent 软件中进行边界条件、计算方法等相关内容的设置.选择 3D 分离式、隐式、非稳态求解器,使用凝固/熔化模型模拟癸酸的相变过程.考虑浮升力作用,采用 Boussinesq 近似法.为了直观分析浮升力作用的方向,设置真空管竖直放置.设置熔化过程的边界条件为恒热流,向阳面和背阴面均为  $800 \text{ W/m}^2$ ,相变材料初始温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;凝固过程的边界条件设为恒壁温  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,初始温度为  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ .采用 SIMPLE 算法求解压力和速度耦合项,采用 PRESTO! 算法修正压力,动量、能量方程均采用 First Order Upwind 算法.在真空管轴向上布置了 5 个监测点  $T1 \sim T5$ ,其中每两点之间的间距为 266 mm,径向上布置三个监测点, $T6$ 、 $T3$  和  $T7$ ,如图 4 所示.

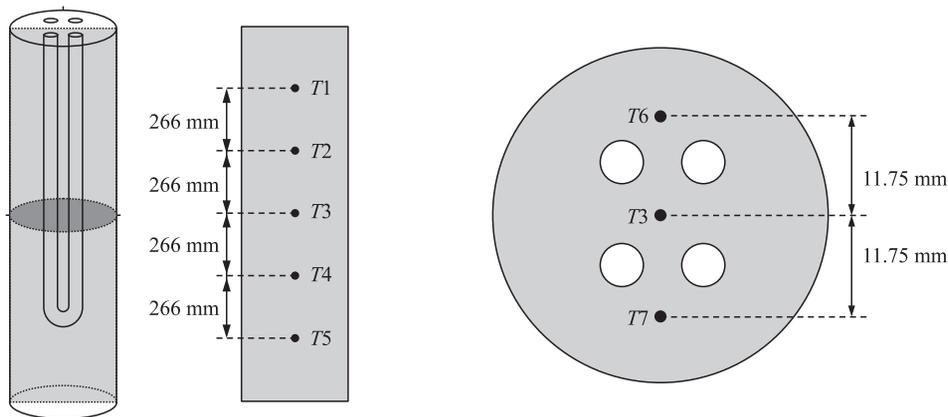


图 4 监测点布置

Fig. 4 Arrangement of monitoring points

## 3 结果与分析

### 3.1 浮升力对相变材料熔化过程的影响

癸酸在真空管中间截面上的熔化过程温度场分布如图 5 所示.由图 5(a)、图 5(b)可知,当  $\tau = 500 \text{ s}$  时,考虑浮升力和不考虑浮升力温度场分布大体上一致,这是因为集热器吸收太阳辐射,温度从管壁向内层逐渐递减,此时仅有管壁附近的温度略高于癸酸的熔点 ( $32.66 \text{ }^\circ\text{C}$ ),管腔内的最低温度为  $298 \text{ K}$ ,相变材料大部分还未熔化,浮升力的影响几乎可以忽略.这一阶段内癸酸以固态显热进行储存热量,传热方式以热传导为主.

随着相变材料大部分熔化,浮升力的影响逐渐显现出来.当  $\tau = 3000 \text{ s}$  时,如图 5(c)所示,管内最高温度  $405 \text{ K}$  出现在轴向顶部位置,轴向底部径向中心位置处温度最低为  $302 \text{ K}$ ,接近癸酸的熔点,表明此时绝大部分相变材料已经熔化.在浮升力影响下真空管上下温度分布开始出现不均匀,真空管顶部的温度

大于底部,并且顶部和底部的温差逐渐增大.图5(d)中不考虑浮升力时,管内最高温度在管壁附近为382 K,最低温度位于管中心为302 K,纵向温度分布始终均匀,在真空管垂直方向上温度梯度为0. $\tau=4\,500\text{ s}$ 时,如图5(e)所示,在浮升力影响下纵截面温度场产生了明显的分层现象,最高温度出现在纵向最高处为474 K,纵向最底层温度最低为303 K,且温度梯度与重力方向相反,说明浮升力方向是由下及上的,导致热流体产生了上浮.

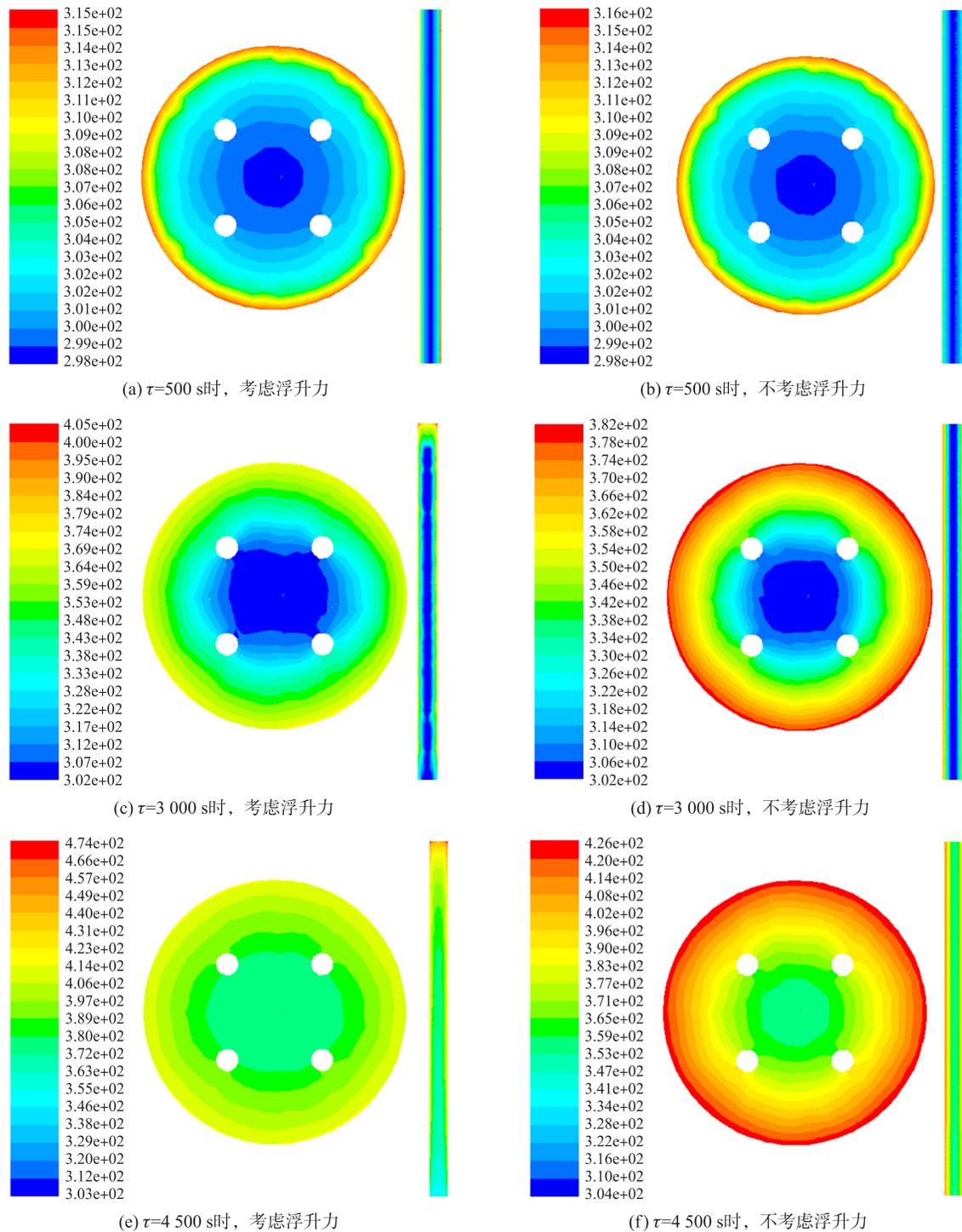


图5 考虑浮升力和不考虑浮升力的熔化温度场分布

Fig. 5 Temperature distribution with and without buoyancy during melting

由图5可知,考虑浮升力时真空管内最高温度应大于不考虑浮升力时管内最高温度,因为当癸酸发生相变后,液相体积分数增加,在浮升力的作用下,与壁面的换热速率加快,换热量增加,从而导致温度上升速率大于不考虑浮升力的情况.从 $\tau=500\text{ s}$ 到 $\tau=3\,000\text{ s}$ 时段内,考虑浮升力和不考虑浮升力的真空管内

最高温度差从 1 K 增加到 23 K;而从  $\tau=3\ 000\ \text{s}$  到  $\tau=4\ 500\ \text{s}$  这个时段内,温差从 23 K 增加到 48 K. 这表明温差增长的速率随着液相体积分数增大而加快,浮升力对相变过程的影响是逐渐增强的.

图 6 对比了两种情况的相变材料液化率变化曲线. 从图中可以看出:500 s 内,真空管内相变材料大部分是固态,此时传热方式以导热为主,浮升力的作用可以不考虑. 因此出现图 5(a) 和图 5(b) 之间相近的温度场分布. 直到 1 350 s 液化率达到 0.5 后,浮升力的作用开始显现,考虑浮升力时相变材料液化率上升更快,随着时间推移,两条曲线的差距越来越大. 这说明液化率越大,浮升力对相变材料熔化过程的影响越大. 当不考虑浮升力时,熔化时间为 4 100 s,而考虑浮升力的作用时,熔化时间为 3 250 s,时间缩短了 24%. 显然,浮升力加快了相变材料的熔化进程,减少了真空管的蓄热所需时间. 这是因为浮升力是由于温度差引起密度差而产生的,随着熔化时间增加,真空管内温差越大,浮升力引起的自然对流就越强,考虑浮升力的相变材料得到的热量越多相变越快.

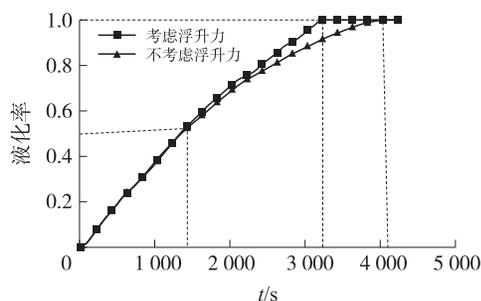


图 6 熔化过程的平均液化率曲线  
Fig. 6 Average liquefaction rate curve during melting

### 3.2 浮升力在熔化过程中的作用方向

图 7 为考虑浮升力时不同监测点上的温度变化曲线. 由图 7(a) 可知,相变材料未完全液化前 ( $\tau < 3\ 250\ \text{s}$ ),轴向各点的温度一致相同. 完全液化后 ( $\tau > 3\ 250\ \text{s}$ ) 各点的温度开始出现偏离,最终产生了轴向方向由下及上的温度梯度. 随着蓄热时间的增加,  $T_1$  和  $T_5$  之间的温差越来越大,且除了  $T_1$  和  $T_5$  外,相邻测点的温度梯度几乎一致. 这主要因为它们所处的位置不同升温速率不同,最高处的升温速率最快. 说明浮升力的方向由下及上,在浮升力作用下,完全液化的相变材料随着蓄热时间的增加,自然对流的影响更大,使得真空管内温度梯度变大,且温度最高的相变材料具有最小的密度,在浮升力作用下处于真空管的轴向最高处. 因此竖直放置的真空管内相变材料在完全液化后,轴向方向上传热方式主要以对流传热为主.

由图 7(b) 可知,  $T_6$ 、 $T_7$  两点的蓄热曲线基本一致,且比真空管中心点  $T_3$  处的温度高.  $\tau=2\ 300\ \text{s}$  时靠近壁面的两点  $T_6$ 、 $T_7$  先完成相变,真空管中心点  $T_3$  处至  $\tau=3\ 250\ \text{s}$  时才结束相变过程,表明相变过程固-液相界面沿着径向方向由管壁向中心移动. 真空管内癸酸完全液化后,径向方向相邻两测点的温度梯度相同. 这说明在真空管径向上,几乎不存在自然对流的影响. 因此,竖直放置的真空管在径向方向上,传热方式以热传导为主,可以忽略自然对流.

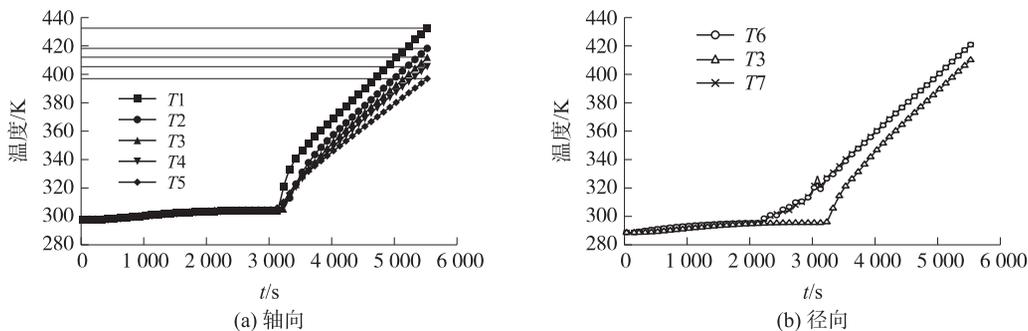


图 7 各监测点温度变化曲线  
Fig. 7 Temperature change curve of each monitoring point

### 3.3 浮升力对相变材料凝固过程的影响

图 8 为相变材料凝固过程的温度场分布. 由图 8(a)、图 8(b) 可知,在 500 s 内,考虑浮升力和不考虑浮升力的真空管内温度场几乎一致. 这是因为刚开始凝固时,真空管内相变材料均为液态,且温度分布比较均匀,因此由温度差引起的浮升力的作用并不显著.

随着冷却的进一步进行,浮升力的作用显现出来. 对比图 8(c)、图 8(d) 可知,此时考虑浮升力和不考虑浮升力的真空管内最高温度相差了  $24\ ^\circ\text{C}$ ,显然考虑浮升力作用的真空管内温度下降得更快. 由图 8(e)

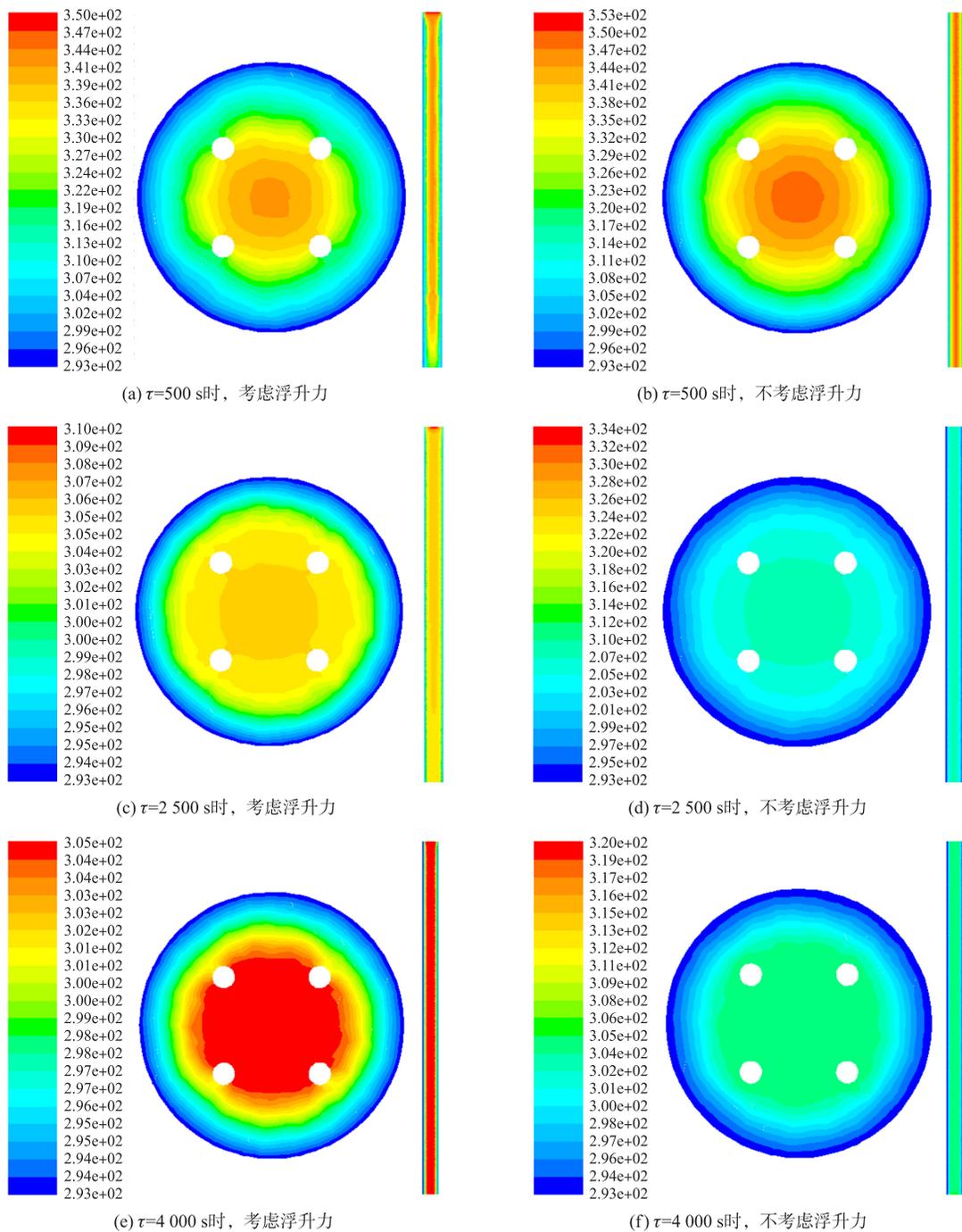


图8 考虑浮升力和不考虑浮升力的凝固温度场分布

Fig. 8 Temperature distribution with and without buoyancy during solidification

可知,  $\tau=4\ 000\ \text{s}$  时, 考虑浮升力的真空管内最高温度已经降到  $305\ \text{K}$ , 表明此时大部分癸酸已经凝固, 轴向上不再存在温度梯度, 此时, 浮升力的影响消失, 相变材料主要通过释放固态显热进一步冷却。

由图9可知, 在凝固过程中, 液化率从1减少到0.5经历了大约  $2\ 000\ \text{s}$ , 而从0.5再减至0的过程则经历了  $10\ 000\ \text{s}$  以上. 因此可知固态显热释热在相变材料凝固过程中占主导. 这是因为在凝固的初始阶段, 相变材料和真空管壁面之间温差较大, 导致传热量较大, 传热速率较快, 而后期以固态显热传热时, 相变材料与壁面间

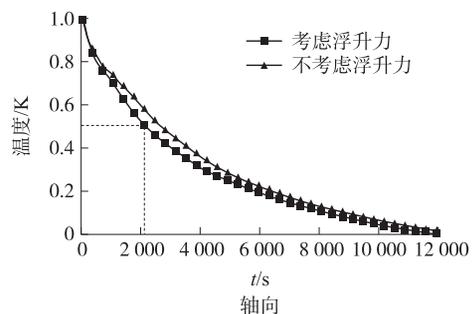


图9 凝固过程的平均液化率曲线

Fig. 9 Average liquefaction rate curve during solidification

的温度差很小,传热速率较慢;另外一个原因是,在液化率较高时浮升力的影响较大,所以与壁面间的换热速率较快。

此外,充灌癩酸的真空管在考虑浮升力作用前后,凝固时间几乎一致.这说明浮升力引起的自然对流对相变材料凝固过程的影响很小,可以忽略不计.在凝固过程中,相变材料处于液相或者固-液两相区的时间较短,主要以固态显热传热为主,浮升力的影响较弱。

## 4 结论

本文利用 FLUENT 软件对竖直真空管内相变材料的熔化和凝固过程进行了数值模拟,利用 Boussinesq 近似法研究了浮升力对相变过程的影响,通过对比分析不同时刻的温度场分布、液化率以及不同测点的温度变化曲线,得到以下结论:

(1) 浮升力对相变材料熔化过程起着至关重要的作用,考虑浮升力作用后,液化时间缩短了 24%,加速了熔化的进程.且真空管中液相体积分数越大,浮升力的影响越显著。

(2) 凝固过程中,浮升力的影响可以忽略不计。

(3) 熔化过程中,真空管内顶部的升温速度快于底部,随着蓄热时间的增加,真空管内的温差越来越大.沿着轴线浮升力的方向与温度梯度的方向相反,浮升力的方向由下及上。

(4) 竖直放置的真空管内相变材料在轴向上的传热方式,固态显热和相变蓄热阶段以导热为主,液态显热蓄热时以对流传热为主,而在径向上始终以导热为主。

## [参考文献] (References)

- [1] GRISSA K, BENSELAMA A M, LATAOUI Z, et al. Performance of a cylindrical wicked heat pipe used in solar collectors: Numerical approach with Lattice Boltzmann method[J]. *Energy Conversion & Management*, 2017, 150: 623–636.
- [2] XU R J, ZHANG X H, WANG R X, et al. Experimental investigation of a solar collector integrated with a pulsating heat pipe and a compound parabolic concentrator[J]. *Energy Conversion & Management*, 2017, 148: 68–77.
- [3] 张维蔚, 王甲斌, 田瑞, 等. 热管式真空管太阳能聚光集热系统传热特性分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(3): 202–209.
- [4] 张云峰, 夏寻, 罗嵩容, 等. 磁纳米流体热管太阳能集热装置换热性能试验[J]. *热能动力工程*, 2018, 33(2): 117–123.
- [5] 曾冬琪, 李慧, 代彦军. 内插管式太阳空气集热器阵列集热性能与流动阻力研究[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(3): 546–552.
- [6] 袁颖利, 李勇, 代彦军, 等. 内插式太阳能真空管空气集热器实验研究[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(11): 1429–1433.
- [7] DAN N N, SMYTH M, HAGHIGHAT F, et al. Experimental performance evaluation and comparative analyses of heat pipe and direct flow augmented solar collectors[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 60(1/2): 225–233.
- [8] VERDIER D, FALCOZ Q, FERRIERE A. Design of a protection thermal energy storage using phase change material coupled to a solar receiver[J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2014, 33(6): 509–523.
- [9] ABDELSALAM M Y, TEAMAH H M, LIGHTSTONE M F, et al. Hybrid thermal energy storage with phase change materials for solar domestic hot water applications: Direct versus indirect heat exchange systems[J]. *Renewable Energy*, 2020, 147: 77–88.
- [10] PAPANIMITRATOS A, SOBHANSARBANDI S, POZDIN V, et al. Evacuated tube solar collectors integrated with phase change materials[J]. *Solar Energy*, 2016, 129: 10–19.
- [11] 邹勇, 仇汝冬, 王霞. 石蜡相变材料蓄热过程的模拟研究[J]. *储能科学与技术*, 2020, 9(1): 101–108.
- [12] KANT K, SHUKLA A, SHARMA A. Heat transfer studies of building brick containing phase change materials[J]. *Solar Energy*, 2017, 155: 1233–1242.
- [13] LIBEER W, RAMOS F, NEWTON C, et al. Two-phase heat and mass transfer of phase change materials in thermal management systems[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 100: 215–223.
- [14] 杨智舜, 陈丽华, 夏振华. 固液相变材料储能过程传热机制的数值模拟[J]. *储能科学与技术*, 2019, 8(6): 1217–1223.
- [15] 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.
- [16] 费华, 顾庆军, 王林雅, 等. 癩酸-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.
- [17] CHANDRMANI Y, RASHMI R S. 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.

[责任编辑: 陈 庆]