

水平圆管蓄热器的传热及非线性特性研究

王娇娇¹, 杨 茉²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海建桥学院, 上海 201306)

摘要:利用 Fluent 软件对水平圆管外石蜡受热融化的相变蓄热过程进行数值模拟,采用基于焓法的凝固/融化模型,考虑自然对流,建立圆管外石蜡融化模型,其左右壁面冷却温度为 293 K,上、下壁面为绝热边界条件,中间加热管壁温度为 363 K,矩形腔宽为 60 mm,分别取 30, 60 和 120 mm 底边长作为特征尺寸,中间圆管直径为 20 mm,分析圆管外石蜡受热融化后液相区石蜡的非对称流动特性。结果表明:当瑞利数 $Ra = 5.27 \times 10^6$ 时数值解的轨迹在相空间中呈现一个不动点,表明是一个稳定定态解;当 $Ra = 4.22 \times 10^7$ 时数值解的轨迹在相空间中为一封闭曲线,表明解是周期振荡解;在 $Ra = 3.38 \times 10^8$ 时数值解的轨迹在相空间中没有确定的周期,解是随机的;数值结果揭示了在相同的冷却和加热温度下,改变模型的特征尺寸,融化过程的解不止一个定态。

关键词:圆管;相变蓄热;自然对流;非对称流动;定态解

中图分类号:TK124 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.12.008

[引用本文格式]王娇娇,杨 茉.水平圆管蓄热器的传热及非线性特性研究[J].热能动力工程,2021,36(12):49-55. WANG Jiao-jiao, YANG Mo. Study on heat transfer and nonlinear characteristics of horizontal circular tube regenerator[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(12): 49-55.

Study on Heat Transfer and Nonlinear Characteristics of Horizontal Circular Tube Regenerator

WANG Jiao-jiao¹, YANG Mo²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093; 2. Shanghai Jianqiao College, Shanghai, China, Post Code: 201306)

Abstract: Fluent software was used to numerically simulate the phase change heat storage process of paraffin melted by heat outside the horizontal circular tube. The solidification or melting models based on enthalpy method were used to consider the effect of natural convection. A paraffin melting model outside the circular tube was established, in which the cooling temperatures of the left and right wall surfaces were 293 K, the upper and lower wall surfaces were adiabatic boundary conditions, the wall temperature of the middle heating tube was 363 K, the width of the rectangular cavity was 60 mm, the bottom side lengths of 30 mm, 60 mm and 120 mm were taken as the feature sizes respectively, and the diameter of the middle circular tube was 20 mm. The asymmetric flow characteristics of paraffin in the liquid phase region were analyzed after the paraffin was melted by heat outside the circular tube. The research results show that

收稿日期:2020-04-11; 修订日期:2021-01-12

基金项目:国家自然科学基金(51736007)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51736007)

作者简介:王娇娇(1995-),女,河南平顶山人,上海理工大学硕士研究生。

通讯作者:杨 茉(1958-),男,辽宁辽中人,上海建桥学院教授。

when Ra is 5.27×10^6 , the trajectory of the numerical solution presents a fixed point in the phase space, which indicates that it is a stable steady state solution; when Ra is 4.22×10^7 , the trajectory of the numerical solution is a closed curve in the phase space, which indicates that the solution is a periodic oscillation solution; when Ra is 3.38×10^8 , the trajectory of the numerical solution has no definite period in the phase space, and the solution is random. The numerical results reveal that there is more than one steady state solution in the melting process by changing the feature sizes of the model at the same cooling and heating temperatures.

Key words: circular tube, phase change heat storage, natural convection, asymmetric flow, steady state solution

符号说明

ρ —密度, kg/m^3
 T_h —圆管外加热温度, K
 f —液相率
 p —压力, Pa
 T_c —左右壁面冷却温度, K
 v_y — y 方向的速度, m/s
 c_p —比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 T_{initial} ——初始温度, K
 λ —导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
 g —重力加速度, m/s^2
 L —相变潜热, J/kg
 u_x — x 方向的速度, m/s
 β —体积膨胀系数, K^{-1}
 L^* —特征长度, mm
 t —时间, s
 α —热扩散率, m^2/s
 ν —运动粘度, m^2/s
 μ —动力粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
 Ra —瑞利数
 F_o —傅里叶数
 v_m —监测点处的速度, m/s

Seddegh^[1]研究了采用相变材料(PCM)的立式和卧式管壳储能系统的热行为,得到了相变材料融化过程的固液界面和温度分布图;Bechiri 等人^[2]利用指数积分函数和变量分离技术,得到了相变材料在融化/凝固过程中的非稳态温度分布等对热效率的影响;Parvin 等人^[3]采用数值模拟的方法,模拟方形封闭空间内加热圆柱的自然对流换热,得到了流场的流线图并认为流场是对称的;Hosseini 等人^[4]采用实验和数值模拟相结合的方法研究了石蜡融化和凝固过程中的热行为和传热特性,研究表明,提高换热流体入口温度可以有效减少总融化时间;林道光等人^[5]利用 Fluent 软件模拟了管壳式相变蓄热器内石蜡融化的过程,研究了翅片高度、宽度及翅片数量对传热效率的影响;李伟等人^[6]对方形槽内水平圆管外石蜡的相变蓄热过程进行了数值模拟,得出材料初温对相变过程的影响较小;周慧琳等人^[7]取矩形储热单元的二维对称面为计算模型,结果表明,提高壁面和相变材料之间的温差能够明显缩短换热过程的时间;陈刚等人^[8-9]分析了方腔底部加热和圆管内石蜡受热融化的相变传热过程中的非线性特性;杨莱等人^[10]采用 SIMPLE 算法,对封闭方腔内水平板自然对流传热进行数值模拟,研究正方形腔内水平板自然对流的振荡、分岔以及混沌吸引子等非线性特性;战乃岩等人^[11]采用 SIMPLE 算法,对底部加热三维长方体内空气自然对流进行数值模拟并与实验结果进行对比,研究了所求得的数值解的振荡、分岔以及混沌等非线性特性。

综上所述,文献[3,7]研究给出的流场流线图和等温线图显示相变融化过程是对称的,而且文献

引 言

相变蓄热器是利用相变材料在相变过程中吸收(释放)大量相变潜热的特点,将热(冷)量储存起来,以解决时间和空间不匹配问题的装置。其具有蓄热密度高,蓄热容器体积小,温度恒定等优点。在相变蓄热系统中,管壳式相变蓄热器是一种常见的蓄热器形式,在工业余热回收、太阳能利用和电厂“移峰填谷”等领域具有广阔的前景。因此,研究管壳式相变蓄热器的传热过程具有重要的意义。

[7]只取二维对称面为计算模型,认为计算结果也是对称的,但实际上对称解是不稳定的;文献[8-11]是在考虑自然对流的情况下对其所研究问题中存在的一些非线性特性进行研究。本文采用基于焓法的数值方法,对二维矩形腔内圆外石蜡的融化过程进行了数值模拟。采用非稳态的数学模型,考虑自然对流,对全区域进行求解。通过改变 Ra , 研究在不同参数下,具有对称结构的模型内部石蜡融化过程的相变传热特性,并进一步研究模型中所表现出的非线性特性。

1 数值模拟

1.1 物理模型

图 1 为二维矩形腔内水平圆管外石蜡相变蓄热的物理模型,模型边长 120 mm,高度 60 mm,圆管直径为 20 mm。在圆管外矩形腔内装的是相变材料石蜡,圆管内部的换热流体与管外的相变材料进行热量交换,矩形腔 4 个壁面均为铝制材料,故矩形腔的四周导热良好。图中给出监测点的分布, a_1 、 a_2 距离圆管中心的距离分别为 15 和 10 mm。

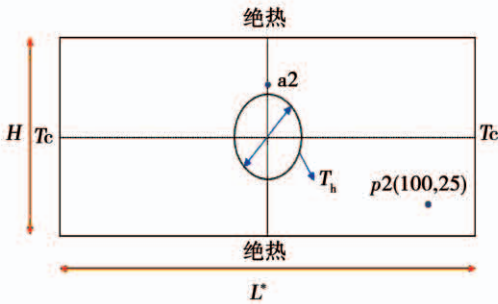


图 1 物理模型

Fig.1 Physical model

1.2 数学模型

对模型进行简化,做出如下假设:

(1) 连续性介质假设,即相变材料在不同相时其热物性是均匀的;(2) 液态相变材料是不可压缩牛顿流体,流动状态为层流,二维非稳态流动,不考虑黏性耗散问题;(3) 管壁温度保持恒定;(4) 石蜡密度设置采用 Boussinesq 假设,即只在浮力项中考虑密度变化,其余物性参数不随温度变化,如表 1 所示。

表 1 石蜡的物性参数

Tab.1 Physical parameters of paraffin

参数	数值
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	900
比定压热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	2 950
动力粘度/ $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$	0.03
固相导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	0.28
液相导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	0.14
体积膨胀系数/ K^{-1}	0.001
相变潜热/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	205.6
固相温度/K	325
液相温度/K	328

在固液相变过程中,固液相界面的位置是不断发生变化的,这使得相变过程存在一定的非线性现象,因此精确解较难得到。实际上大多数非线性方程都不存在解析解,但是利用近似计算方法和计算机模拟,很容易求得方程的数值解或用图形把数值解表示出来,因此采用基于焓法的数值模拟来求解。焓法是将热焓和温度作为待求的参数,然后建立能量方程,利用数值模拟求解热焓分布,进而利用焓值确定表征液化比例的液相率,再根据液相率区分液相区、固相区和相界面,根据此法建立的控制方程。

连续性方程:

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

动量方程:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + S_u \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + S_v \quad (3)$$

能量方程:

$$\rho \left(\frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \frac{\lambda}{c_p} \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) + S_H \quad (4)$$

$$H = h + \Delta H \quad (5)$$

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT \quad (6)$$

$$\Delta H = fL \quad (7)$$

式中: H —总焓值, J/kg ; h —显热比焓, J/kg ; ΔH —潜

焓, J/kg; h_{ref} —初始焓值, J/kg; L —相变潜热, kJ/kg。

$$f = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_L - T_s}, & T_s < T < T_L \\ 1, & T > T_L \end{cases} \quad (8)$$

式中: $T_{s(L)}$ —固(液)温度, K。

$$S_u = \frac{(1-f)^2}{(f^3 + \varepsilon)} A_{mush} u \quad (9)$$

$$S_v = \frac{(1-f)^2}{(f^3 + \varepsilon)} A_{mush} v + \frac{\rho_{ref} g \beta (h - h_{ref})}{c_p} \quad (10)$$

式中: S_u 、 S_v — x 、 y 方向的动量源项; ε —小于 0.000 1 的数, 取值 0.000 01, 防止被零除; A_{mush} —糊状区域的连续数, 其作用是引入一个阻尼项, 取值范围数量级为 $10^4 \sim 10^7$, 通常取 10^5 。

能量源项:

$$S_H = \frac{\rho}{c_p} \frac{\partial(\Delta H)}{\partial t} \quad (11)$$

1.3 边界条件及网格无关性验证

使用 ANSYS FLUENT 软件对水平圆管外石蜡受热融化的相变蓄热过程进行数值模拟, 网格划分采用四面体非结构网格, 计算中采用二维非稳态求解器, 考虑重力场, 选择基于焓值凝固/融化模型对蓄热过程进行计算, 材料密度采用 Boussinesq 假设, 考虑自然对流在相变传热过程中的影响。计算方法中速度与压力求解采用解压力耦合方程的半隐式法, 压力项采用空间离散方式, 能量方程采用二阶迎风差分格式。相变材料初始温度设置为 293 K, 必须低于石蜡的相变温度。时间步长选择 0.05 s, 之后再对监测窗口进行设置, 对流场初始化后进行计算。

划分网格时, 进行网格无关性验证, 验证结果如图 2 所示。网格数分别是 17 800 和 21 240 的计算结果中液相率随傅里叶数变化趋势基本相同, 两者相差较小, 而网格数为 9 440 与其他两个相差较大。因此, 可以认为网格数为 17 800 时数值模拟便可以达到要求的精度, 故而采用网格数 17 800。

1.4 数值模拟方法验证

为验证数值模拟方法的可靠性, 采用与文献 [12-13] 相同的工况即圆管温度为 330.15 K, 初始温度为 303.15 K, 将数值计算结果与文献 [12] 实验和文献 [13] 数值模拟结果进行比较, 如图 3 所示。

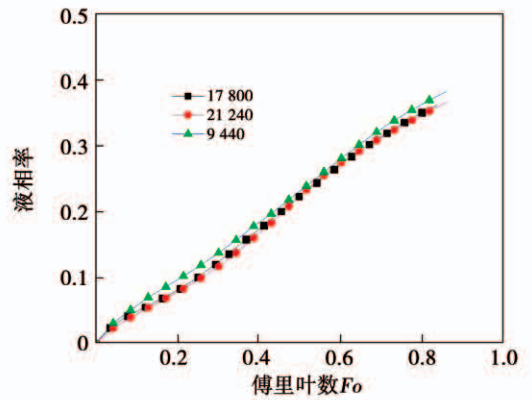


图 2 不同网格数时液相率随傅里叶数的变化
Fig.2 Variations of liquid phase rates with Fourier number at different grid numbers

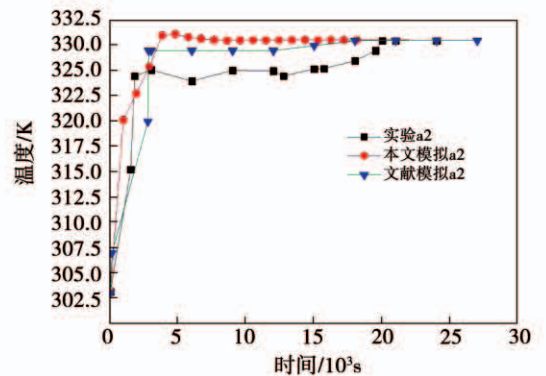


图 3 监测点处温度随时间的变化
Fig.3 Variations of temperatures with time at monitoring points

由图 3 可知, 本文模拟结果与文献 [13] 数值计算结果相差较小, 与实验结果有相同的趋势, 但是数值模拟时的温度要比实验先达到稳定状态。这是因为数值计算考虑的是绝热条件, 不考虑散热损失, 而实验条件下很难确保完全绝热, 存在一定的散热损失, 而且实验是三维的, 本文数值计算和文献 [15] 都是二维计算。综合考虑, 本文所采用的模型可以较为准确地模拟矩形腔内水平圆管外石蜡相变传热过程。

2 结果与分析

2.1 相变过程流场分析

图 4 为特征长度 120 mm, $Ra = 3.38 \times 10^8$ 时融化过程的流线图。傅里叶数 $F_o = 0.11$ 时, 固体石蜡通过与加热壁面间进行热量传递开始融化, 此时流

线是 6 个对称的涡线,热量传递以导热为主;随着液相体积的增加,流动具有一定的空间,在 $F_o = 0.20$ 时流线开始出现不对称现象,而且涡的数量由开始的 6 个变为 4 个;随着液相持续增多,在 $F_o = 1.56$ 时涡的体积逐渐增大,两边的大涡逐渐向上变大;由于浮力的作用,矩形腔内上部分的石蜡最先融化,在 $F_o = 2.02$ 时,融化到顶部,两边的涡逐渐与中间的涡合并成 2 个大涡,但是不对称性比较明显;随着液相逐渐增多,自然对流越发明显且占据主导地位,在 $F_o = 6.55$ 时,整体来看流线逐渐稳定,靠近管壁面的位置,由于温差较大以及自然对流的作用,流线浮动较远离管壁处的大;随着融化达到稳定状态,即 $F_o = 16.63$ 时流线最终也达到了稳定。由此可见,在自然对流的影响下,随着融化的进行, F_o 在 $0 \sim 0.20$ 之间流场是对称的, F_o 在 $0.20 \sim 2.02$ 之间流场不对称,之后逐渐趋于对称,这也说明了相变融化过程是存在非对称现象的。

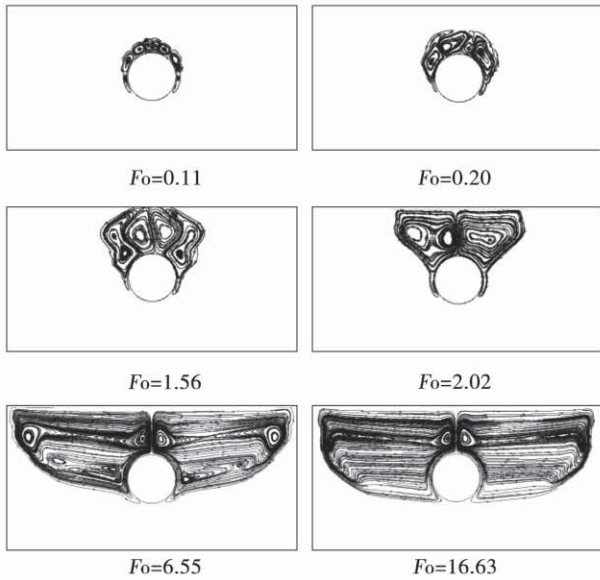


图 4 $L^* = 120 \text{ mm}$ 时融化过程中不同时刻的流线图

Fig. 4 Streamline diagrams of different moments in melting process when L^* is 120 mm

图 5、图 6 分别为模型特征尺寸取 60 和 30 mm 时融化过程的流线图。在融化开始时加热壁面上方出现 6 个对称的小涡,与图 4 中 $F_o = 0.11$ 时涡线的分布和形状几乎相同,这是因为开始融化时传热主要是依靠导热,流场没有太大的变化。在 $F_o = 0.20$ 时,流线几乎仍是对称的,而图 4 中 $F_o = 0.20$

时流场已经开始了明显的不对称;涡的数量也有明显不同,图 5 中涡的数量由原来的 6 个变为 4 个,而图 6 中涡的数量由 6 个变成了 2 个,这是因为特征长度为 30 mm 时,腔体变得非常狭长,而两边又是冷壁面,在浮力的作用下,流场只能向中上方聚集,两边的小涡没有存在的空间,迅速汇集成大涡;随着融化的进行,液相逐渐增多,图 5 在 $F_o = 1.07$ 时流场才开始出现流场不对称的现象,而图 6 与图 4 在 $F_o = 0.20$ 时就出现明显不对称现象;这种不对称现象一直持续到 2.02,在自然对流趋于稳定后,流场开始逐渐趋于对称。由此可见,改变模型尺寸后,流场的变化大致相同,即在 F_o 为 $0 \sim 0.20$ 时流场是对称的,为 $0.20 \sim 2.02$ 时是不对称的,之后流场越来越对称。因此可以认为在相变融化过程中存在非对称现象,如果仅仅以对称面作为计算区域,不足以说明全区域的流动特性。

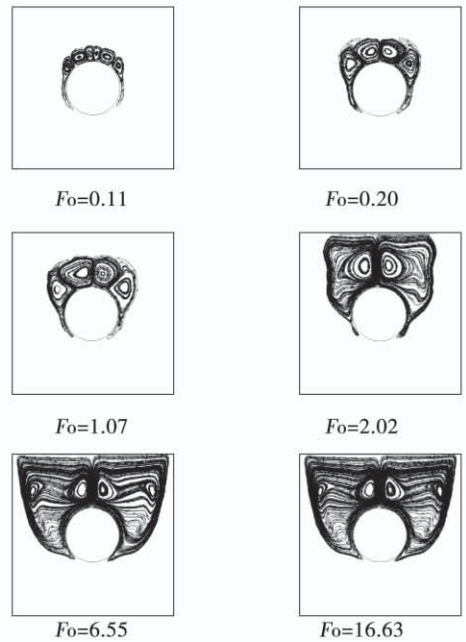


图 5 $L^* = 60 \text{ mm}$ 时融化过程中不同时刻的流线图

Fig. 5 Streamline diagrams of different moments in melting process when L^* is 60 mm

2.2 相变传热过程的非线性验证

在自然对流的影响下,相变蓄热过程存在非对称现象,流场也具有非常复杂的非线性特性。为了更清楚地表述相变过程在自然对流影响下产生的非线性特性,利用 Fluent 软件进行计算,以相轨迹图和时间序列图的形式表示一个非线性方程的解不止一

个定态,并且这些定态的稳定性也不一样。通过改变瑞利数,设立监测点分别为 $x = 3, 10$ 和 20 mm , $y = 35 \text{ mm}$,进而得到监测点处的相轨迹和时间序列图,分析不同监测点处速度随时间变化的规律和速度相图变化规律。图 7 为 $Ra = 5.27 \times 10^6, 4.22 \times 10^7$ 和 3.38×10^8 时速度随时间变化的曲线和相轨迹图。

差引起的浮升力不足以抵抗导热的稳定作用,因此在融化稳定之后流体的速度一直稳定在一个定值,数值解在相轨迹图中呈现为一个不动点,表明解是稳定定态解; Ra 为 4.22×10^7 时,流体速度随着融化的进行不断变化,通过局部放大图可以看出,变化总是周而复始地进行,即振荡具有确定的周期,数值解的轨迹在相空间中为一封闭曲线,此时解是周期振荡解;随着 Ra 的增大,自然对流的影响也越来越大,当 Ra 为 3.38×10^8 时,数值解虽然大体上限制在一定范围内,但变化却是杂乱无章的,数值解的轨迹在相空间中并没有确定的周期,解是随机的。

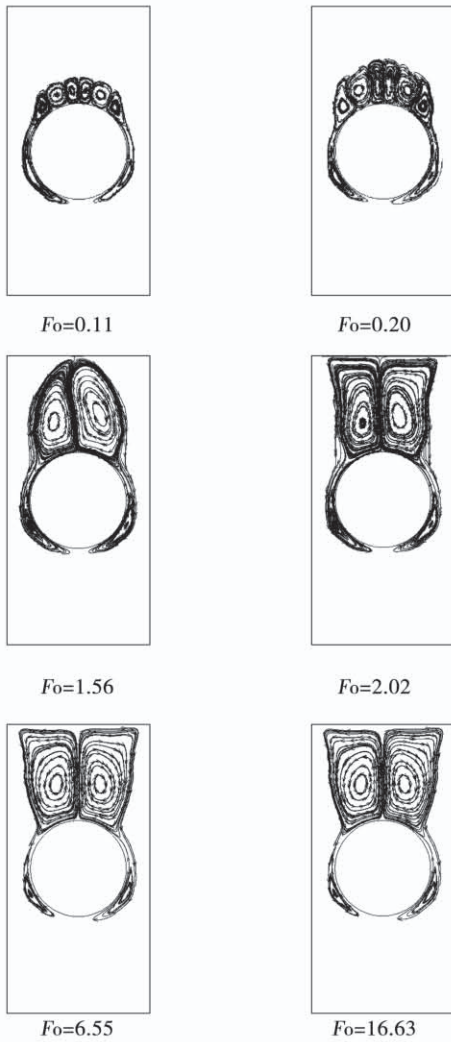


图 6 $L^* = 30 \text{ mm}$ 时融化过程中不同时刻的流线图
Fig. 6 Streamline diagrams of different moments in melting process when L^* is 30 mm

由图 7 可知,在融化初期流体主要是以导热为主,流速是零,之后流速由零突然增大,在速度增加至最高点时又开始逐渐降低。随着液相增多,在固液密度差和重力的影响下,自然对流开始产生,流体流动增强,流体的速度突然增大。

Ra 为 5.27×10^6 时,流体驱动力较弱,由流体温

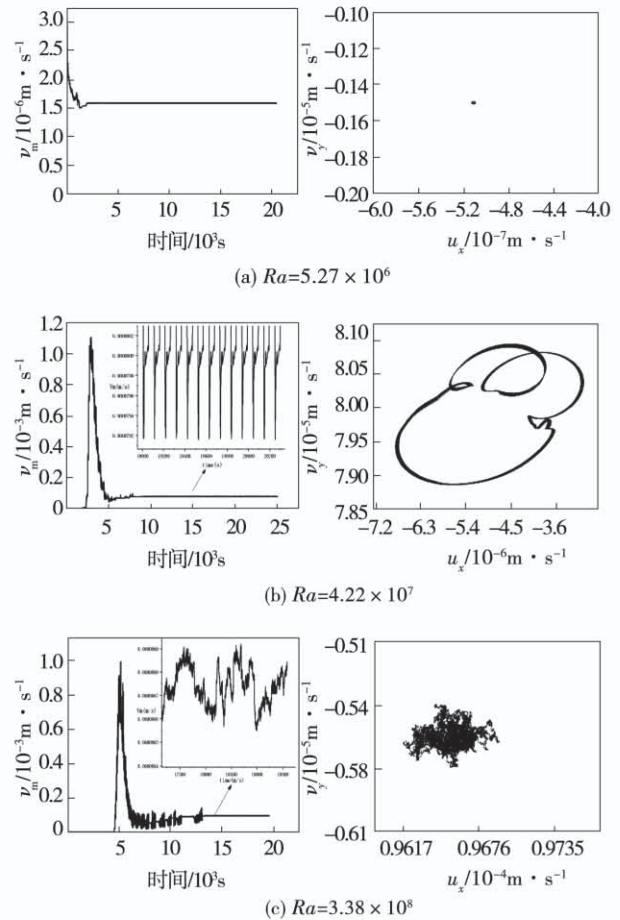


图 7 不同 Ra 时速度随时间变化及速度相轨迹图
Fig. 7 Variations of velocities with time and velocity phase trajectory charts at different Ra numbers

3 结 论

(1) 对矩形腔内水平圆管蓄热器建立二维物理模型和数学模型,并采用 Fluent 软件对融化过程进行计算,将模拟结果与文献模拟结果以及实验结果

进行比较,结果表明所使用的模型可以很好地预测石蜡融化过程。

(2) 圆管外的石蜡在受热融化过程中,固体石蜡通过与加热壁面间进行热量传递开始融化,石蜡由固相变为液相,传热方式由导热为主过渡到以自然对流为主。

(3) 随着液相增多,在固液密度差和重力的影响下,产生自然对流,流场由开始的对称变为不对称,经过一段时间后,流场又逐渐趋于对称,说明相变蓄热过程中存在非对称现象,如果仅以对称面作为计算区域,不足以说明全区域的流动特性。

(4) 采用相轨迹和时间序列图法分析了不同 Ra 时解随时间的振荡,当 Ra 为 5.27×10^6 时,流动和换热处于稳定的状态,数值解在相轨迹图中呈现一不动点,表明解是稳定定态解;当 Ra 为 4.22×10^7 时,流动与换热由稳态过渡到非稳态,数值解的轨迹在相空间中为一封闭曲线,表明解是周期振荡解;当 Ra 为 3.38×10^8 时,流动和换热时由周期振荡过渡到无规则的混沌状态,数值解的轨迹在相空间中并没有确定的周期,解是随机的。由此可以说明,圆管外相变蓄热过程中存在非对称流动和融化过程的解有不止一个定态,揭示了融化过程是一个复杂的非线性过程。

参考文献:

- [1] SEDDEGH S, WANG X, HENDERSON A D. A comparative study of thermal behaviour of a horizontal and vertical shell-and-tube energy storage using phase change materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 348 - 358.
- [2] BECHIRI M, MANSOURI K. Analytical solution of heat transfer in a shell-and-tube latent thermal energy storage system[J]. Renewable Energy, 2015, 74: 825 - 838.
- [3] PARVIN S, ALIM M A, HOSSAIN N F. Prandtl number effect on cooling performance of a heated cylinder in an enclosure filled with nanofluid[J]. International communications in heat and mass transfer, 2012, 39(8): 1220 - 1225.
- [4] HOSSEINI M J, RAHIMI M, BAHRAMPOURY R. Experimental and computational evolution of a shell and tube heat exchanger as a PCM thermal storage system[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014, 50: 128 - 136.
- [5] 林道光. 相变材料蓄热特性的模拟研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2013.
LIN Dao-guang. Simulation study on heat storage characteristics of

- phase change materials[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2013.
- [6] 李伟, 赵军, 李新国. 方形槽内水平圆管外相变蓄热过程的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2012, 27(2): 181 - 186, 262 - 263.
LI Wei, ZHAO Jun, LI Xin-guo. Numerical simulation of phase change heat storage outside horizontal tube in square groove[J]. Thermal Power Engineering, 2012, 27(2): 181 - 186, 262 - 263.
- [7] 周慧琳. 矩形单元内石蜡熔化/凝固过程传热特性研究及结构优化[D]. 济南: 山东大学, 2020.
ZHOU Hui-lin. Study on heat transfer characteristics and structure optimization of wax melting / solidification process in rectangular unit[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [8] 陈刚, 杨莱, 张政, 等. 底部加热方腔内的相变传热过程及其非线性特性[J]. 动力工程学报, 2020, 40(10): 815 - 819, 831.
CHEN Gang, YANG Mo, ZHANG Zheng, et al. Phase change heat transfer process and its nonlinear characteristics in a bottom heated square cavity[J]. Journal of Power Engineering, 2020, 40(10): 815 - 819, 831.
- [9] 陈刚, 杨莱, 胡卓焕. 圆管蓄热器的传热及非线性研究[J]. 热科学与技术, 2020, 19(2): 126 - 131.
CHEN Gang, YANG Mo, HU Zhuo-huan. Heat transfer and nonlinear study of circular tube heat storage[J]. Thermal Science and Technology, 2020, 19(2): 126 - 131.
- [10] 杨莱, 黄夫泉, 章立新, 等. 水平板自然对流换热的非线性特性[J]. 工程热物理学报, 2008(2): 275 - 277.
YANG Mo, HUANG Fu-quan, ZHANG Li-xin, et al. Nonlinear characteristics of natural convection heat transfer in horizontal plate[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008(2): 275 - 277.
- [11] 战乃岩, 杨莱. 底部加热长方体腔内自然对流的非线性特性[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(2): 299 - 301.
ZHAN Nai-yan, YANG Mo. Nonlinear characteristics of natural convection in a bottom heated rectangular cavity[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(2): 299 - 301.
- [12] 李新国, 李伟, 郭英利. 圆管外石蜡相变蓄热与释热实验研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(7): 1223 - 1225.
LI Xin-guo, LI Wei, GUO Ying-li. Experimental study on phase change heat storage and release of paraffin outside circular tube[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(7): 1223 - 1225.
- [13] 柯彬彬. 圆管外石蜡相变传热过程数值模拟及传热强化[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
KE Bin-bin. Numerical simulation and heat transfer enhancement of paraffin phase change heat transfer process outside circular tube[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.