

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.02.005

石蜡相变储能装置的熔化传热数值模拟

纪 玮, 刘伟军*

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘 要:为了探究石蜡在管壳式相变储能装置传热过程的影响因素,笔者对水平放置的管壳式储能装置中石蜡的熔化过程进行了数值模拟。研究了加热源表面温度和截面偏心率变化对熔化过程产生的影响。设置不同的加热源温度和截面偏心率进行模拟,对熔化过程的液相率曲线、液相率云图和温度云图的变化进行分析。结果表明:提高加热源表面的温度会使熔化时间缩短,但在达到一定温度后,熔化时间的变化不大;增大模型偏心率会缩短熔化时间,在研究模型中,偏心率为1.0时熔化时间最短。文中数值模拟方法可为管壳式相变储能装置的设计提供参考。

关 键 词:蓄热储能;相变材料;熔化传热;偏心率

中图分类号:TK02

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2022)02-0027-07

Numerical Simulation of Melting Heat Transfer of Paraffin Phase Change Energy Storage Device

Ji Wei, Liu Weijun*

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to study the factors affecting the heat transfer process of paraffin in a shell and tube phase change energy storage device, the melting process of paraffin in a horizontally placed shell and tube energy storage device was numerically simulated. The influence of changing heating source temperature and cross-section eccentricity on melting process was studied. Different heat source temperature and the cross section eccentricity were set for simulation, the liquid rate curve, liquid rate satellite cloud picture and temperature change of melting process were analyzed. The results show that raising the temperature of heat source can make the melting time shortened, but after reaching a certain temperature, melting time changed little; increasing the eccentricity of the model will shorten the melting time. In the studied model, the melting time is the shortest when the eccentricity is 1.0. The proposed numerical simulation method can provide reference for the design of shell and tube phase change energy storage device.

Keywords: heat storage; phase change material; melting heat transfer; eccentricity

相变储热理论在20世纪80年代被作为新兴技术提出,其理论研究与应用技术在近几十年的不断发展中日趋成熟^[1]。相变储能材料(PCM)已成为相变储热理论的核心,其特点为一定温度下发生相态的变化,同时吸收或放出大量的相变潜热。石蜡作为相变材料具有潜热值较高、结晶速率快和物理化学性质稳定等优点^[2-5]。研究石蜡的熔化传热过程,需要考虑固态区和液态区分界面的变化情况,固态区和液态区之间存

在着一个糊状区,无法用简单的线性叠加方法进行计算求解^[6]。计算流体力学(CFD)的相关研究中,广泛地应用了FLUENT软件对熔化情况进行模拟,将材料的2种相态分别进行求解,对科研工作有很大帮助。张云婷等^[7]模拟了不同工况下相变材料熔化过程,得到了热流体的入口温度对熔化过程起主要作用的结论,相变材料的厚度和初始温度等也有一定程度的影响。邹勇等^[8]通过CFD软件对其熔化过程进行仿真,

收稿日期:2021-09-30;修回日期:2022-01-18

第一作者简介:纪玮(1997),女,江苏无锡人,硕士研究生,主要研究方向为能源材料与节能减排。**通信作者:**刘伟军(1963),男,上海人,博士,教授,主要研究方向为能源材料与节能减排。E-mail:lwj1119@139.com

发现自然对流是熔化速度的重要影响因素。Xu 等^[9]建立了安装多孔介质的卧式相变储热模型,得到了一种节省材料且具有经济效益的模型。Yang 等^[10]通过实验和数值模拟两方面研究了不同长宽比腔体中相变材料的熔化特性,得出了长宽比越小,材料在熔化过程中导热过程越均匀,温度变化越快。Rana 等^[11]通过 CFD 模拟了矩形壳体内部翅片形状改变对传热和熔化的影响,得到了一种更加优化的几何结构,发现在管内加入翅片缩短了相变材料的熔化时间。Seddegh 等^[12]建立了可视化竖直管壳式潜热蓄能系统,发现水平对流循环时熔化过程的重要影响因素。Aveci 等^[13]研究了水平式管壳蓄热单元的熔化过程,发现熔化区域沿径向向上扩散,自然对流可以有效增强传热。

综上所述,管壳式相变储能装置的传热情况受多种因素影响。笔者以石蜡为相变材料,对管壳加热装置偏心率、加热温度对蓄热性能的影响进行了数值模拟,为此类相变熔化实际应用提供参考。

1 模型构建

1.1 物理模型

笔者研究的水平管壳圆管加热相变装置,其横截面如图 1 所示。外壁面半径 R_1 为 30 mm,内壁面半径 R_2 为 15 mm,相变材料填充在 2 个筒壁之间,两管壁均为铝制材料。设置内壁加热温度恒定,外壁面设置为绝热,壁面厚度忽略不计,忽略长度方向上的传热,用二维模型进行模拟分析。为了简化物理模型,作出以下假设:①在二维模型内,相变材料的属性为各项同性;②加热壁面温度处处均匀;③相变材料液体流动为层流;④自然对流的影响考虑在 Boussinesq 假设中。

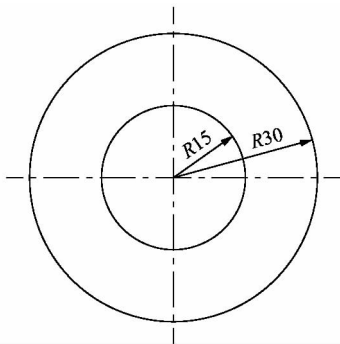


图 1 管壳式储能装置的模型截面

Figure 1 Model section of shell and tube energy storage device

1.2 数学模型

石蜡熔化的过程是固液相变传热,固相和液相之间并非存在着一道明确清晰的分界线,而是存在一个具有厚度的糊状区。相变材料在熔化的过程中,伴随着热量的吸收和释放,且当部分石蜡熔化之后,由于重力和密度的作用液相区产生自然对流换热,使得固相和液相的界面更加难以确定。在研究中采用焓-孔隙率的方法来计算,将温度和焓作为求解变量,在模型内建立统一的方程。液相率为液相区域在整个蓄热材料中所占比例,通过对液相率的监测来间接地描述相变过程中的界面状态变化,计算方程为:

1) 连续性方程

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

2) 动量方程

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

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

3) 能量方程

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

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; u 为速度在 x 方向上的分量; v 为速度在 y 方向上的分量; p 为压强, Pa ; λ 为导热系数, $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$; M 为动量源项, N/m^3 ; μ 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; c_p 为比热容, $\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$; t 为时间, s ; S_h 为能量源项, W/m^3 ; H 为总焓, kJ/kg 。

其中:

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

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

$$\Delta H = \beta L; \quad (7)$$

$$M_x = -A(\beta)u; \quad (8)$$

$$M_y = A(\beta)v - \rho_{\text{ref}}[1 - \alpha(T - T_{\text{ref}})]; \quad (9)$$

$$S_h = \frac{\rho}{c_p} \cdot \frac{\partial \Delta H}{\partial t}; \quad (10)$$

$$A(\beta) = \frac{c(1-\beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon}. \quad (11)$$

式中: c 为糊状区参数; h 为显热, kJ/kg ; ΔH 为潜焓,

kJ/kg ; T_{ref} 为参考温度, K ; h_{ref} 为对应参考温度下的焓, kJ/kg ; ρ_{ref} 为对应参考温度下的密度, kg/m^3 ; β 为液相率, 相变材料为纯固态时为 0, 纯液态时为 1; L 为相变潜热, kJ/kg ; α 为体积膨胀系数, $1/\text{K}$; ε 为小于 0.001 的常数。

液相率 β 的计算公式为:

$$\beta = \begin{cases} 0, & T \leq T_s; \\ \frac{T - T_s}{T_L - T_s}, & T_s \leq T \leq T_L; \\ 1, & T \geq T_L. \end{cases} \quad (12)$$

式中: T_s 为凝固温度, K ; T_L 为熔化温度, K 。

2 相变模拟过程

2.1 定解条件及参数设置

在 FLUENT 软件中选择 Solidification/Melting 模型, 研究方法为基于压力的 Navier-Stokes 方程, 选择 y 方向的重力加速度, 设置为 $-9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 相变材料的物性参数如表 1 所示。

表 1 石蜡的物性参数

Table 1 Physical parameters of paraffin

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	α/K^{-1}	$\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	T_s/K	T_L/K
900	0.001	0.03	325	328

2.2 网格无关性验证

利用 mesh 对二维模型进行网格划分, 对不同精度的模型进行验证, 网格数分别为 3 600, 4 800, 6 000 和 7 200。设置 2 个温度监测点, 其位置坐标分别为 $P_1(0, 20)$ 和 $P_2(0, -20)$ (mm, mm)。测试 2 个点在 270 s 时的温度, 结果如表 2 所示。不同网格数下的模型模拟结果基本一致, 为了保证模拟结果的准确性, 且尽量节省时间, 课题组采用的四边形网格数量为 4 800, 网格划分效果图如图 2 所示。

表 2 不同网格下监测点的温度

Table 2 Temperature of monitoring points under different grids

网格数	P_1 处温度/ K	P_2 处温度/ K	温度差/ K
3 600	328.531 6	328.744 8	0.213 2
4 800	328.408 7	328.336 7	-0.072 0
6 000	328.690 3	328.453 8	-0.236 5
7 200	329.000 6	328.721 0	-0.279 6

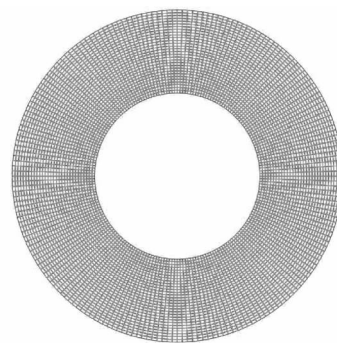


图 2 网格划分

Figure 2 Mesh division

3 模拟结果及分析

3.1 熔化过程分析

根据前期准备设置内壁加热温度为 350 K, 初始环境温度设为 320 K, 监测液相率云图、温度云图和液相率变化曲线。图 3 给出了不同时间下温度和液相率分布云图。其中左半圆为温度云图, 右半圆为液相率云图。红色部分是液态区, 蓝色部分是固态区, 介于两者之间的为糊状区。

在前 30 s 中, 相变材料主要依靠热传导进行热量传递, 热量均匀地由加热内壁向外扩散, 熔化区域也较均匀地增长。在 30 s 到 170 s 之间, 上部的相变材料在导热和自然对流的共同作用下熔化的速度很快, 下部的相变材料受对流换热的作用很小, 熔化区域缓慢向外扩散。在 170 s 之后, 上部的熔化区域较快地向下扩散, 直至上部完全熔化。在 400 s 之后, 固态区域呈凹陷状, 自然对流逐渐变弱, 相变材料依靠热传导进行热量传递。在 600 s 之后, 固态区的传热接触面积越来越小, 图 4 显示了相变材料液相率变化的整体情况, 此时液相率的变化曲线也逐渐趋于平缓。由此可见, 在管壳式储能装置的传热过程中, 对流换热对熔化过程起着十分重要的作用。

3.2 加热温度对熔化过程的影响

在同一模型下, 设置不同的加热源温度分别为 340, 350, 360 和 370 K, 石蜡的液相率变化曲线如图 5 所示。提升加热源的温度在相变过程前期可以加速熔化, 但是对于熔化过程的后期, 加热源起的作用较小。当加热源温度从 340 K 上升到 350 K 时, 熔化时间显著缩短, 而在温度升高到 350 K 之后, 继续提升加热源

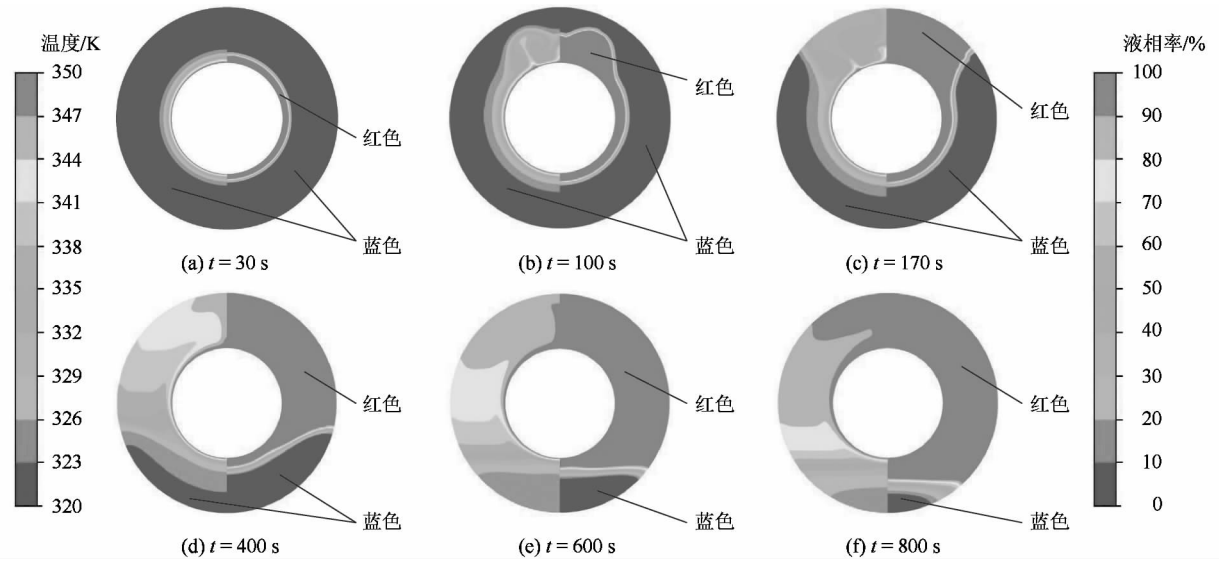


图3 不同时间下相变材料的温度图和液相率分布云图

Figure 3 Temperature distribution cloud diagram and liquid phase rate distribution cloud diagram of PCM at different times

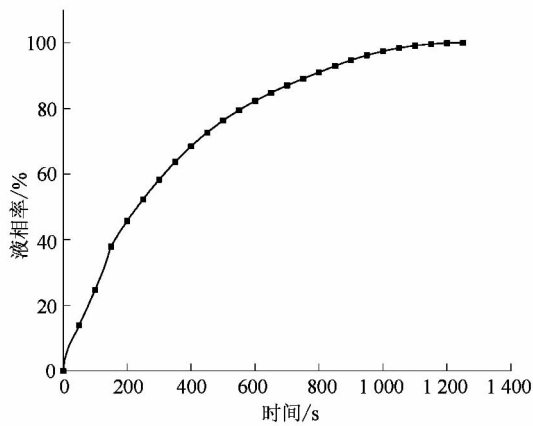


图4 液相率变化曲线

Figure 4 Variation curve of liquid phase rate

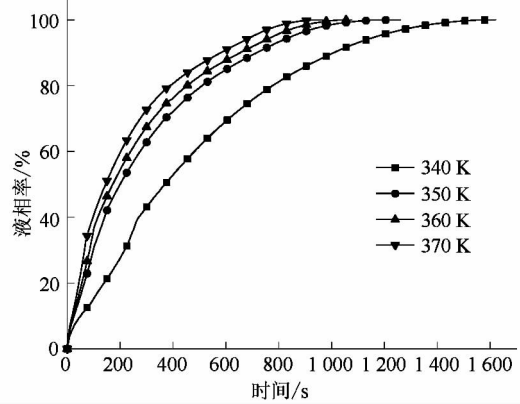


图5 不同加热温度下液相率变化曲线

Figure 5 Variation curve of liquid phase rate at different heating temperatures

温度,熔化时间没有明显缩短,且液相率曲线的变化趋势趋于一致。由此可知,当温度达到一定值后,再继续提升加热源温度,无法明显缩短熔化时间,且增加了能量的损耗,所以在实际应用时,应寻找最佳加热源温度,在保证熔化时间较短的情况下,减少能量的损耗。

3.3 偏心率对熔化过程的影响

如图6所示,管壳加热装置内外圆管圆心的相对位置在竖直方向上可以改变,2圆心的距离为 δ ,偏心率 θ 的表达式为

$$\theta = \frac{\delta}{R_2 - R_1} \times 100\% \quad (13)$$

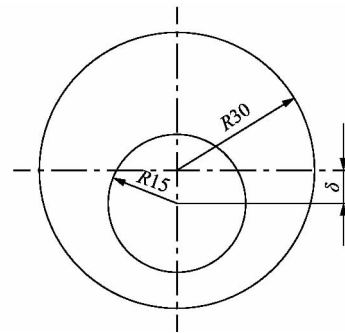
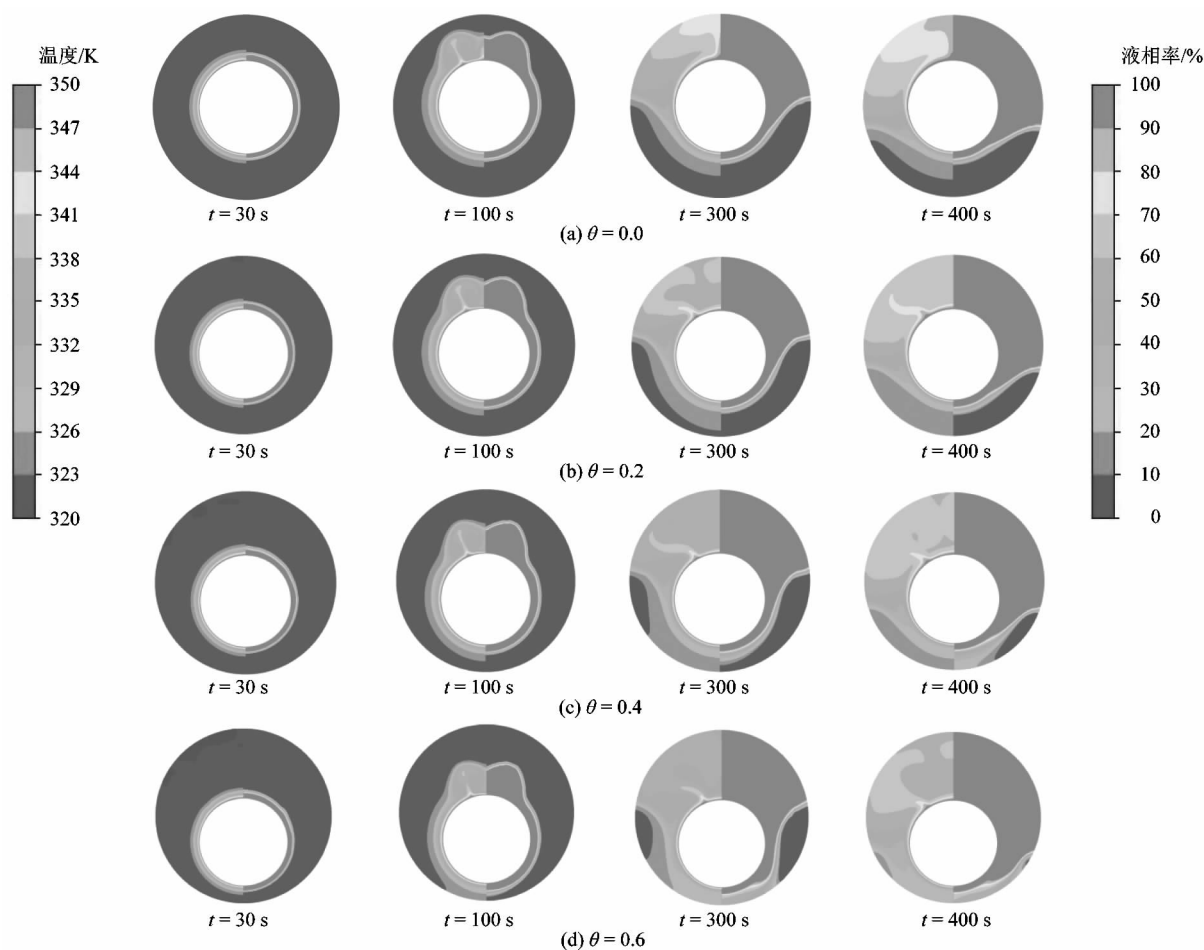


图6 偏心圆管截面示意

Figure 6 Cross section of eccentric circular pipe

改变圆管的偏心率会影响熔化的时间,在加热源温度为 350 K 的情况下,设置模型的偏心率 θ 为 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 和 1.0, 经过模拟得到图 7 所示的温度和液相率云图, 观察发现, 随着加热源的下移, 偏心率小于 0.4 的模型在 100 s 左右向上扩散熔化区域, 而偏心率大于 0.6 的模型同时存在下部扩散熔化区域的情况, 从而改变了部分相变材料熔化的顺序, 整体缩短了熔化时间。图 8 所示的液相率变化曲线显示在 30 s 之前, 各个模型的液相率变化曲线基本重合, 温度和液相率云图也十分相似, 熔化区域较均匀地环绕着加热内壁。在 30 ~ 200 s 之间, 加热面偏心率 θ 在 0.0 ~ 0.4 范围时, 由图 7 所示 30 ~ 300 s 熔化区域向上扩散; 而偏心率 θ 在 0.6 ~ 1.0 范围时, 熔化区域逐渐扩散接触到外管, 且继续向两侧扩散。可以看出当偏心率增大时, 圆管上部的石蜡熔化过程基本一致, 但是下部的石蜡由于占比减少而温升加快熔化相对增多, 接触外管的石蜡产生自然对流现象, 使得下部的石蜡熔化加快, 且未熔化部分与熔化部分接触面积更大,

更有利于传热。因此在 300 s 之后, θ 在 0.6 ~ 1.0 时的液相率已经略高于 θ 在 0.0 ~ 0.4 时的液相率, 且前者的未熔化部分在对流换热和热传导的作用下接收的传热依然较多, 熔化速度较快。400 s 之后, θ 在 0.6 ~ 1.0 范围的熔化过程即将结束, 而 θ 在 0.0 ~ 0.4 范围则进入了缓慢的熔化时期。由于偏心率的不同, 上部的相变材料熔化时能利用的对流换热传热量也不同, 由图 8 可以看出, 200 s 之后 θ 在 0.0 ~ 0.6 范围的液相率曲线逐渐区分开来, 熔化速度随偏心率增大而加快, 主要是因为 θ 在 0.0 ~ 0.6 之间, 随着偏心率的增大, 下部的相变材料逐渐减少, 使得整体熔化时间缩短, 能明显提高熔化速度。在 350 s 之后, $\theta = 0.6$ 和 $\theta = 0.8$ 下部存在 2 个固相区域, 而 $\theta = 1.0$ 时存在 3 个固相区域, 传热接触面积更大, 所以 $\theta = 1.0$ 的熔化速度最快。综上所述, 当偏心率小于 0.6 时, 偏心率增大能明显缩短熔化时间; 当偏心率大于 0.6 时, 熔化时间缩短不明显, 但偏心率为 1.0 时熔化时间最短。



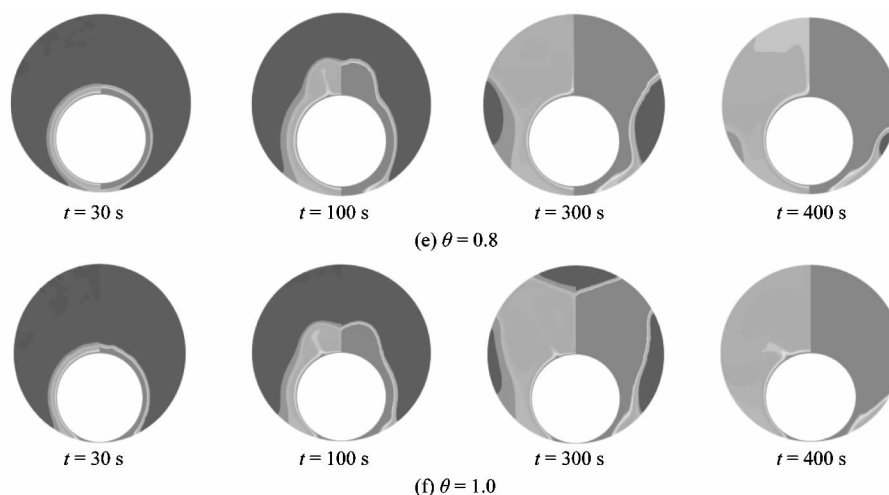


图7 不同偏心率不同时间下相变材料的温度分布和液相率分布云图

Figure 7 Cloud diagram of temperatur and liquid phase ratio distribution of PCM at different eccentricity and time

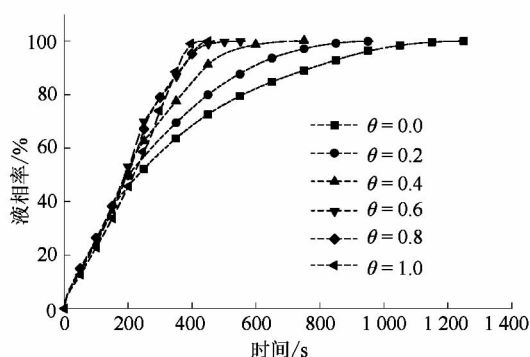


图8 不同偏心率的模型液相率变化曲线

Figure 8 Variation curve of liquid phase rate of model with different eccentricity

4 结论

笔者通过 CFD 对管壳式相变储能装置的石蜡熔化过程进行了数值模拟,分析了自然对流、加热源温度和装置偏心率对传热装置熔化特性的影响,得到以下结论:

1) 自然对流的存在对整个熔化过程影响很大;管壳式储能装置上部的石蜡受对流换热影响先熔化,下部的石蜡在对流换热较小的情况下则熔化十分缓慢。

2) 提高加热源的表面温度不能使熔化时间呈线性增长,在达到一定温度后,熔化时间变化不大。

3) 模型偏心率的增大会缩短熔化时间,当偏心率小于 0.6 时,增大偏心率能明显缩短熔化时间;当偏心

率大于 0.6 时,熔化时间缩短的不明显,本文研究的模型中,偏心率为 1.0 时熔化时间最短。

通过对管壳式相变储能装置的数值模拟,对传热影响因素有了进一步了解,可为管壳式相变储能装置的设计提供参考。本研究的不足之处在于数值模拟设置的环境比较单一,今后可以结合工程环境进行深入研究。

参考文献:

- [1] 郑涛杰,陈志莉,刘洪涛,等. 低温相变储能材料及其应用[J]. 当代化工,2017,46(12):2572-2577.
- [2] 王大伟,余荣升,晏华,等. 碳纤维/石蜡/膨胀石墨复合相变材料的制备及强化传热研究[J]. 材料导报,2014,28(24):70-73.
- [3] ZHANG Q L, ZHAO Y Q, FENG J C. Systematic investigation on shape stability of high-efficiency SEBS/paraffin form-stable phase change materials[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells,2013, 118:55.
- [4] CARDENAS B, LEON N. High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2013,27:725.
- [5] SUN Z M, KONG W A, ZHENG S L, et al. Study on preparation and thermal energy storage properties of binary paraffin blends/opal shape-stabilized phase change materials[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells,2013,117:400.
- [6] 赵海谦,姜卉,刘立君,等. FLUENT 模拟不同内部石蜡相变问题的典型模型分析[J]. 数学的实践与认识,2018,48(23):257-263.

- [7] 张云婷,云和明,张艳玲,等.壳管式相变蓄热装置的数值模拟[J].制冷与空调,2013,27(4):329-334.
- [8] 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.
- [9] XU Y,REN Q L,ZHENG Z J,et al. Evaluation and optimization of melting performance for a latent heat thermal energy storage unit partially filled with porous media[J]. Applied Energy,2017,193(5):84-95.
- [10] YANG X H,WANG X Y,LIU Z,et al. Influence of aspect ratios for a tilted cavity on the melting heat transfer of phase change materials embedded in metal foam[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2021,122:105127.
- [11] RANA S,ZUNAID M,KUMAR R. CFD simulation for heat transfer enhancement in phase change materials[J]. Materialstoday: Proceedings,2021,46(20):10109-11278.
- [12] SEDDEGH S,JOYBARI M M,WANG X L,et al. Experimental and numerical characterization of natural convection in a vertical shell-and-tube latent thermal energy storage system[J]. Sustainable Cities and Society,2017,35:13-24.
- [13] AVCI M,YAZICI M Y. Experimental study of thermal energy storage characteristics of a paraffin in a horizontal tube-in-shell storage unit[J]. Energy Conversion & Management,2013,73:271-277.

（上接第26页）

- [10] 巫江虹,薛志强,金鹏,等.电动汽车热泵空调微通道换热器温度分布特性[J].浙江大学学报(工学版),2016,50(8):1537-1544.
- [11] 唐启天,李康,呼延吉,等.纯电动汽车热泵系统室外侧微通道换热器温度分布实验研究[J].轻工机械,2018,36(5):77-81.
- [12] 胡莎莎,苏林,韩南奎,等.不同流程布置及迎面风速下的微通道冷凝器性能研究[J].制冷技术,2020,40(5):22-28.
- [13] 赵松田,陈华,李玉婷.微通道换热器结露工况下换热特性及其影响的试验研究[J].流体机械,2019,47(10):60.
- [14] 全国家用电器标准化技术委员会.房间空气调节器:GB/T 7725—2004[S].北京:中国标准出版社,2004:10.
- [15] 全国汽车标准化技术委员会.电动汽车能量消耗量和续驶里程试验方法:第1部分 轻型汽车:GB/T 18386.1—2021[S].北京:中国标准出版社,2021:21-22.
- [16] 严瑞东,徐博,陈江平,等.微通道换热器两相分配特性对空调系统性能的影响[J].制冷学报,2013,34(3):20-23.
- [17] 曲昆鹏,郑丽颖.基于目标、背景比例的灰度图像自动阈值选取法[J].应用科技,2010,37(2):52.



www.QCtester.com
因为专业,所以权威
因为用心,所以收获更多

扫一扫 加入我们