

相变材料融化储热中的自然对流增强效应研究

张路曼¹, 赵锡佳², 曹世豪²

(1. 郑州工业应用技术学院 建筑工程学院, 河南 郑州 451100; 2. 河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:为了明确相变材料融化储热中的自然对流增强效应,开展侧边恒定热源下的相变石蜡融化储热试验,建立流-固-热三场耦合下的相变材料融化储热计算模型,分析自然对流传热影响的尺寸效应和方向性,并进一步研究加热温度和初始温度等因素对储热效率的影响。结果表明:在侧边恒定温度热源下,方腔内液相自然对流运动将导致倾斜状的融化前缘,融化储热效率提升了12.1倍;液相自然对流影响存在尺寸效应,在方腔边长小于2 mm后其增强效应基本可忽略不计;液相自然对流运动受热源方向影响显著,热源方向角由90°向270°旋转时,液相自然对流效应将被逐渐激活,流动状态将由单一大环流向若干无规则小环流转变,最终在底部热源下达到最大储热效率,并转变为波浪形的融化前缘形态;加热温度由60℃增至100℃时自然对流增强系数提升了20%,初始温度由25℃降至5℃时自然对流增强系数降低了10.2%。

关键词:相变材料;融化储热;自然对流;增强效应

中图分类号:TK114 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.08.015

[引用本文格式]张路曼,赵锡佳,曹世豪.相变材料融化储热中的自然对流增强效应研究[J].热能动力工程,2024,39(8):128-136. ZHANG Luman, ZHAO Xijia, CAO Shihao. Study on enhancement effect of natural convection during melting heat storage process of phase change materials[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(8): 128-136.

Study on Enhancement Effect of Natural Convection During Melting Heat Storage Process of Phase Change Materials

ZHANG Luman¹, ZHAO Xijia², CAO Shihao²

(1. School of Architectural Engineering, Zhengzhou University of Industrial Technology, Zhengzhou, China, Post Code: 451100;
2. College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, China, Post Code: 450001)

Abstract: In order to clarify the enhancement effect of natural convection during the melting heat storage of phase change material (PCM), the melting heat storage experiment of phase change paraffin under constant heat source on side was carried out. Based on the fluid-solid-thermal coupling theory, the calculation model of melting heat storage in PCM was established. The size effect and directivity impacted by natural convection heat transfer were analyzed, and then the influence of heating temperature and initial temperature on heat storage efficiency was studied. The results show that at a constant temperature heat source on the side, the natural convection movement of liquid phase in the square cavity will lead to a inclined melting front, and improve the melting heat storage efficiency by 12.1 times. There is a size effect under natural convection in liquid phase, the enhancement effect can be basically negligible when the side length of the square cavity is less than 2 mm. The natural convection movement in liquid phase is significantly affected by the direction of heat source. When the heat source direction angle rotates from

收稿日期:2024-01-25; 修订日期:2024-03-27

基金项目:国家自然科学基金(51908197);河南省科技攻关项目(242102240026)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (51908197); Tackle Key Problems in Science and Technology Project of Henan Province (242102240026)

作者简介:张路曼(1987-),女,郑州工业应用技术学院讲师。

通信作者:曹世豪(1988-),男,河南工业大学副教授。

90° to 270°, the liquid phase natural convection effect will be gradually activated, the flow state of liquid phase will change from a single large circulation to several small irregular circulation, finally, the maximum heat storage efficiency is achieved under the bottom heat source, and change into a wavy melting front. When the heating temperature increases from 60 °C to 100 °C, the natural convection enhancement coefficient is increased by 20%. When the initial temperature drops from 25 °C to 5 °C, the natural convection enhancement coefficient decreases by 10.2%.

Key words: phase change materials, melting heat storage, natural convection, enhancement effect

引 言

随着全球经济的快速发展对能源的大量消耗,造成了常规化石能源的逐渐枯竭以及大气环境的严重污染。面对这一挑战,通过开发储能系统实现资源的可再生利用是解决该问题的有效办法之一^[1]。目前,热能的储存方式主要有显热、潜热和热化学 3 种。有机相变石蜡因具有潜热高、温度稳定和无污染等优点,成为蓄热和热管理系统的首选材料,并被逐渐用于减小空调峰值负载、利用太阳能系统余热、冷链物流以及电池系统的被动热管理等诸多领域^[2-4]。

由于相变材料的融化过程直接决定了其相变潜热储能效率,使得该方向研究一直是近年来的关注热点。为了实现相变材料融化过程中的流-固-热三场耦合,等效热融法、等效黏度法和焓孔法等先后被提出^[5-7]。Cao 等人^[8]提出了将自然对流影响合并到热传导中的等效导热系数法,从而大大提高了计算效率。在实际工程应用中,为了克服有机相变石蜡低热传导性能的天然缺陷,通过添加高导纳米颗粒和嵌入金属基体等方式提升相变材料的储热效率^[9-11]。Selvakumar 等人^[12]提出了增强介电相变材料储热的电-浮耦合新方法。与上述主动增强方式不同,液相自然对流运动传热的增强效应为被动式,其激活程度受到储腔尺寸、储腔形状、热源方向和热源大小等诸多因素的影响^[13-14]。同时,在融化储热过程中,Chen^[15]依据液相流动规律和融化前缘特征,将底部热源下的相变石蜡储热过程分为热传导、稳定增长、过渡和湍流等 4 个区段。通过合理地利用液相自然对流传热,不仅可以提升相变材料融化储热效率,同时还节约了成本。

本文针对相变材料融化储热中的自然对流增强效应问题开展研究。首先,通过开展侧边加热下方腔内相变石蜡融化储热试验,证实液相自然对流对融化储热的影响;随后,基于流-固-热三场耦合理

论,建立了相变材料融化储热计算模型,依据试验记录的总融化时间和融化前缘特征验证计算模型的正确性;最后,系统地分析了自然对流增强效应的尺寸效应和方向性,以及加热温度和初始温度等因素的影响,明确相变材料融化储热中的自然对流增强效应。本文研究成果可为相变储热系统设计中控制利用自然对流增强储热效率提供理论依据。

1 相变石蜡融化储热试验

为了实测液相自然对流运动在相变石蜡融化储热过程中的影响,设计并开展相变石蜡融化储热试验,融化储热试验装置如图 1 所示。

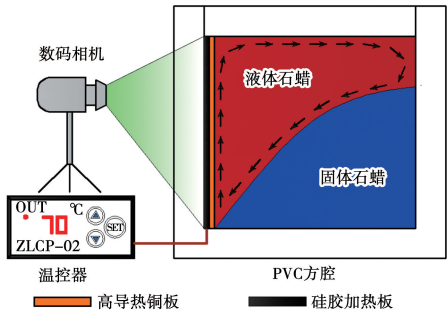


图 1 融化储热试验装置

Fig. 1 Melting heat storage test setup

该实验装置由 PVC 高透明方腔容器、300 K 融点的相变石蜡、硅胶加热板、高导热铜板以及数码相机等组成。方腔容器内部横截面尺寸为 100 mm × 100 mm,容器内充满初始温度约为 16 °C 的相变石蜡。相变石蜡由上海焦耳蜡业有限公司提供,熔点为 300 K,潜热为 210.5 kJ/kg。试验时,左侧加热面采用硅胶加热板施加 70 °C 的恒定温度热源。加热面表面温度是由硅胶加热板自带的温度控制器控制,精度为 ±1 °C。为了保证表面温度的均匀性,在硅胶加热板表面粘贴了 1 块厚度为 2 mm 的高导热铜板。试验前,采用多路温度采集仪对铜板表面随机 3 个位置的温度进行测量,相对误差小于 1 °C,满

足均匀性要求。相变石蜡融化储热过程中的相态变化,通过数码相机以 10 min 间隔进行拍照记录。

图 2 为试验过程中记录的相变石蜡融化前缘演化过程。其中,融化分数 f 表示液相所占比例。

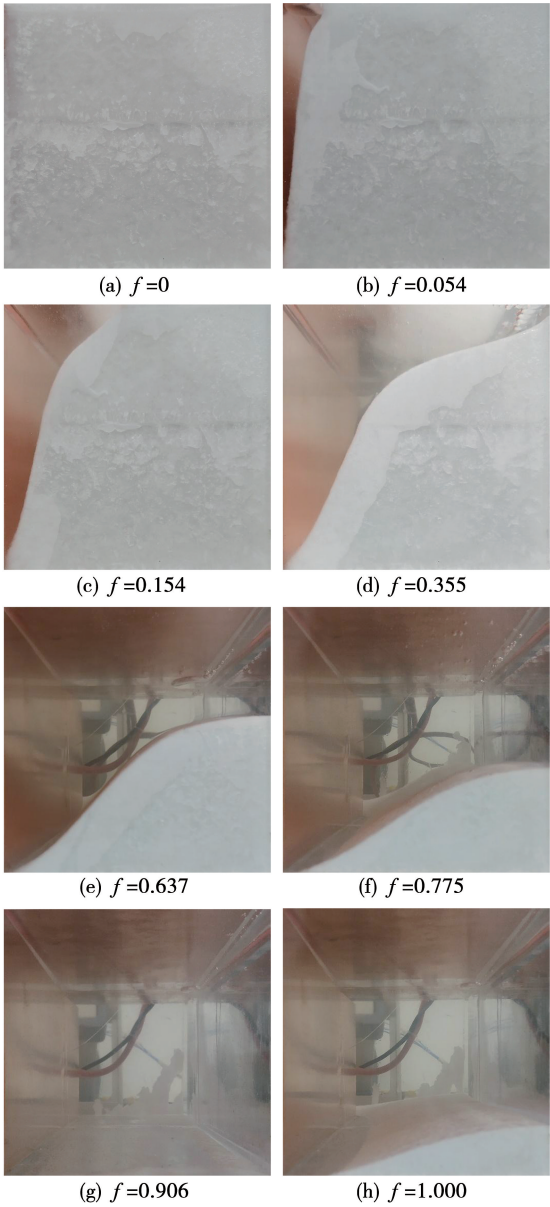


图 2 相变石蜡融化储热过程

Fig. 2 Melting heat storage process of phase change paraffin

由图 2 可知,在左侧恒定温度热源下,相变石蜡的融化前缘呈现倾斜状态,且倾斜角度随着融化储热发展而逐渐增大,整个融化趋势由左上端向右下端发展。融化前缘的倾斜特征变化是由温差驱动下的液相自然对流运动传热所引起的。在加热至约 180 min 时,对应的融化分数 $f=1$,表示此时相变石

蜡完成融化储热。此外,相变石蜡融化储热过程包含了热量传输、固液相变、融化边界动态演化和液相自然对流运动等,是极为复杂的流-固-热三场耦合问题。

2 相变材料融化储热计算模型

2.1 计算模型

采用 COMSOL 多物理场耦合分析软件,建立流-固-热三场耦合下的相变石蜡融化储热计算模型,如图 3 所示。对应的材料参数见表 1。计算模型尺寸为 100 mm × 100 mm,单元尺寸为 1 mm。模型左侧设置为 $T_w=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒定、无滑移壁面,其余边为绝热、无滑移壁面。初始时刻,整个模型的温度为 $T_0=16\text{ }^{\circ}\text{C}$,相变石蜡处于凝固状态。规定加热面外法线方向与 x 坐标轴的夹角为 θ ,则图 3 左侧热源对应的方向角 $\theta=180^{\circ}$ 。

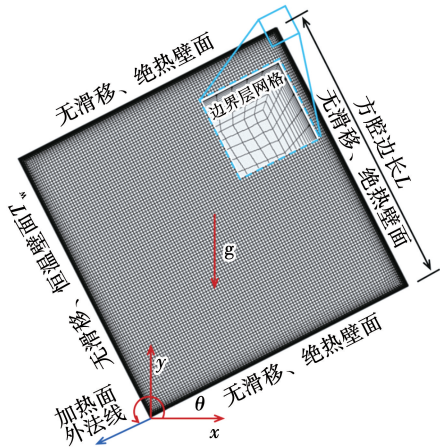


图 3 计算模型

Fig. 3 Calculation model

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

参 数	数 值
密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	880
比定压热容 $c_p/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	3 220
导热系数 $\lambda/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0.2
动力粘度 $\mu/\text{Pa}\cdot\text{s}$	0.005 79
融化温度 T_m/K	300
相变温度间隔 $\Delta T/\text{K}$	1
融化潜热 $L/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	210.5
热膨胀系数 α/K^{-1}	0.001

相变石蜡的相态以液体分数 $B(T)$ 来表示,其中液体分数 $B(T)$ 与温度 T 的关系为^[5]:

$$B(T) = \begin{cases} 0, & T \leq T_s \\ (T - T_s)/\Delta T, & T_s < T < T_l \\ 1, & T_l \leq T \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_s —相变材料固态温度上限; T_l —相变材料液态温度下限; $\Delta T = T_l - T_s$ —融化区间。

相变材料融化后,在温差下会产生体积力 F :

$$F = -\rho[1 - \alpha(T - T_m)]g \quad (2)$$

式中: g —重力加速度。

液相在体积力下产生自然对流运动,满足连续性方程^[6-7]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

动量方程:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \mathbf{F} + \mu_1 \cdot \nabla^2 \mathbf{u} - \frac{\xi(1 - B(T))^2}{B^3(T) + \varepsilon} \mathbf{u} \quad (4)$$

能量方程:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) + \rho C \mathbf{u} \cdot \nabla T = 0 \quad (5)$$

式中: $\mathbf{u}$ —速度矢量; t —时间; p —压强; ξ, ε —与材料相关的系数; μ —动力黏度。

动力黏度与液体分数 $B(T)$ 的关系^[10]:

$$\mu(T) = \mu_1 \left(1 + \frac{\xi(1 - B(T))^2}{B^3(T) + \varepsilon} \right) \quad (6)$$

式(1)、式(6)为固液界面的控制方程。当 $T > T_l$ 时,动力黏度 $\mu = \mu_1 = 0.005\,79\,\text{Pa} \cdot \text{s}$,此时石蜡处于液态,对应的液体分数 $B(T) = 1$;当 $T < T_s$ 时,动力黏度将增至液态石蜡的 10^8 倍,此时的超高黏度液体的流动将被限制,可近似为固体;当 $T_s < T < T_l$ 时,石蜡处于固态和液态之间,称之为模糊区,对应的液体分数 $0 < B(T) < 1$ 。模糊区为固、液相的分界面,其厚度约为 $1\,\text{mm}$ 。

2.2 模型验证

基于试验和计算模型,得到的相变石蜡融化储热过程中的融化分数 f 与融化时间 t 的关系如图 4 所示。

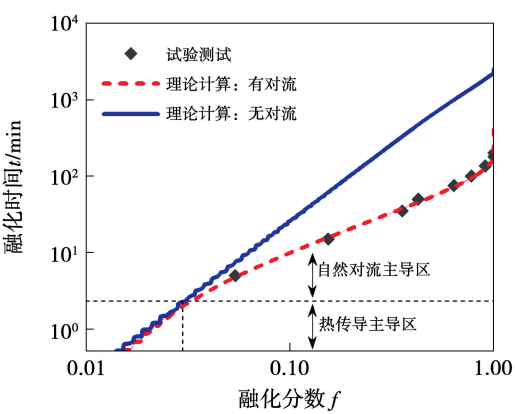


图 4 融化分数与融化时间关系曲线

Fig.4 Relation curve of melting fraction and time

由图 4 可知,试验测试和理论计算结果曲线有较好的一致性。以总融化时间为参考进行误差分析,其中试验记录的总融化时间约为 $180\,\text{min}$,理论计算(有对流)的总融化时间为 $170.3\,\text{min}$,两者相差 5.6% 。尽管试验中方腔采用了隔热性能较好的 PVC 塑料板,但方腔外表面不可避免地还是会与环境大气间发生对流热交换,导致试验中左侧加热面的加热量略微大于石蜡所获得的热量。有自然对流传热下的相变石蜡融化储热过程如图 5 所示。

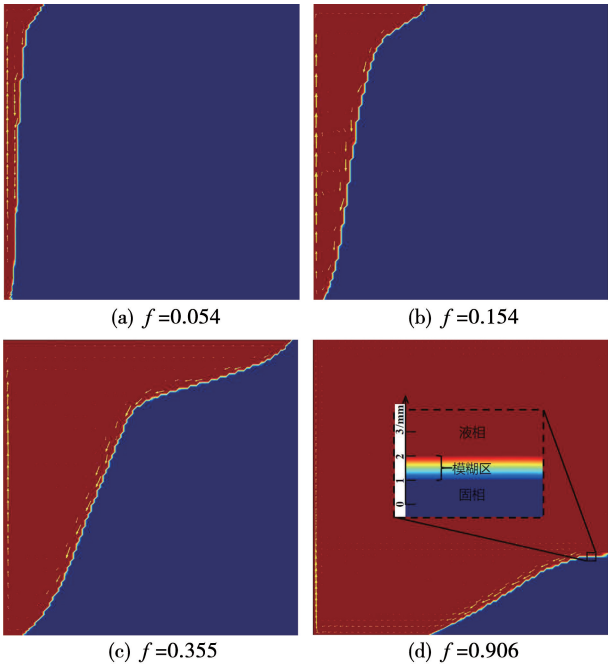


图 5 有自然对流传热下的相变石蜡融化储热过程

Fig.5 Melting heat storage process of phase change paraffin with natural convection heat transfer

图中,白色线为融化边界,左侧为液相,右侧为固相,箭头表示液相流动方向,下图同。通过对比图 2、图 5 发现,试验记录的相变石蜡融化前缘倾斜特征与理论预测结果一致性较高。理论与实测结果的一致性,可认为本文所建立的流-固-热三场耦合下的相变石蜡融化储热计算模型基本是正确的。

3 计算结果及分析

3.1 自然对流的影响

无自然对流传热的相变石蜡融化储热过程如图 6 所示。由图 6 可知,在不考虑液相自然对流运动传热的影响时,相变石蜡的融化前缘呈直线分布,且始终平行于左侧加热面,与图 2 所示试验记录的真实融化过程存在显著差异。

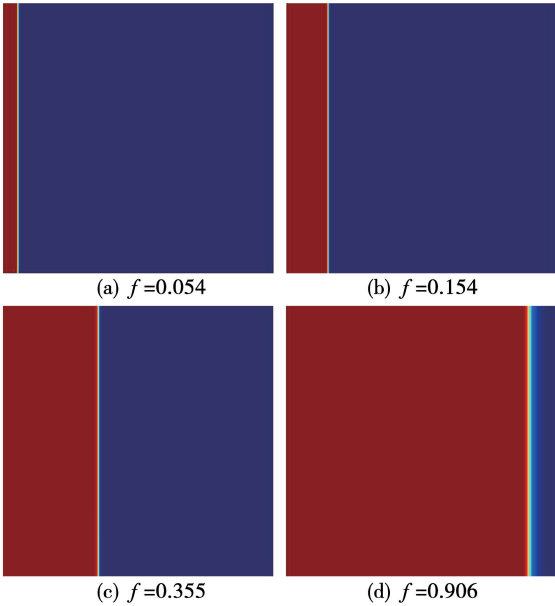


图 6 无自然对流传热下的相变石蜡融化储热过程
Fig. 6 Melting heat storage process of phase change paraffin without natural convection heat transfer

由图 4 可知,在不考虑自然对流传热时,相变石蜡的总融化时间为 2 231.7 min,相对于有自然对流时(170.3 min)增加了 12.1 倍。此外,在融化起始阶段 $t < 3$ min,两种情况下的计算曲线基本处于重合状态,表示在此阶段内液相的自然对流运动处于被抑制状态。当融化时间超过 3 min 后,液相的自然对流运动逐渐被激活,且流动传热效果随融化时间增加而加强,表明自然对流运动传热有随液相体积增大而加强的特性。整个融化阶段的 98% 范围

内是由自然对流传热所主导的,而热传导主导的范围不足 2%。综合上述实测与理论分析结果可知,相变材料液相自然对流传热效应在相变材料融化储热性能分析时是不可忽略的。同时,为了定量描述自然对流传热的影响,将有对流时的总融化时间 t_c 与无对流时的总融化时间 t_n 之比所得到的无量纲量,定义为自然对流增强系数 λ :

$$\lambda = t_c / t_n \tag{7}$$

3.2 自然对流影响的尺寸效应

为了分析自然对流的尺寸效应,计算得自然对流增强系数 λ 与方腔尺寸 L 的关系,如图 7 所示。由图 7 可知,随着方腔尺寸的增加,自然对流增强系数呈现显著增加的变化趋势。在方腔边长 $L=2$ mm 时,自然对流增强系数约为 1.039,表明此时自然对流传热对相变石蜡融化储热的影响不足 4%。在方腔尺寸小于 2 mm 时,自然对流效应的影响基本可忽略不计,此时可将复杂的流-固-热三场耦合下的相变材料融化储热计算模型简化为单一的瞬态热场计算模型,从而在保证计算精度的前提下大大节约计算时间。此外,基于自然对流影响的尺寸效应,通过合理设计容器尺寸,可达到控制自然对流增强系数的目的。

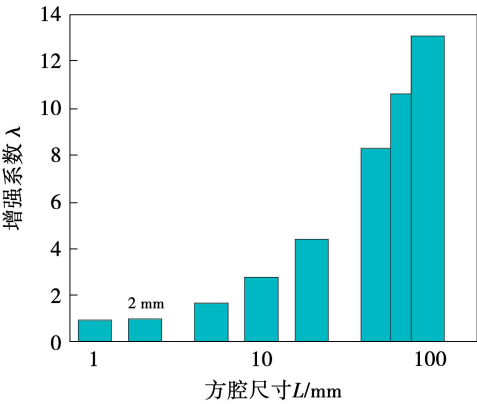


图 7 自然对流的尺寸效应
Fig. 7 Size effect of natural convection

3.3 自然对流影响的方向性

为了研究自然对流影响的方向性,将图 3 所示的计算模型以 30° 角度间隔逆时针旋转 360° ,计算得到自然对流增强系数 λ 与热源方向角 θ 的关系如图 8 所示,不同角度下相变石蜡的融化前缘特征如图 9 所示。

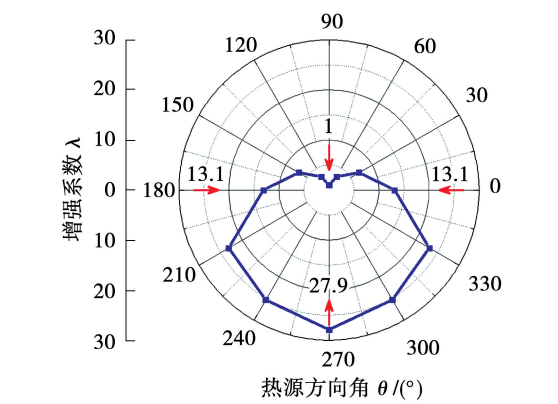


图 8 自然对流影响的方向性

Fig. 8 Directionality affected by natural convection

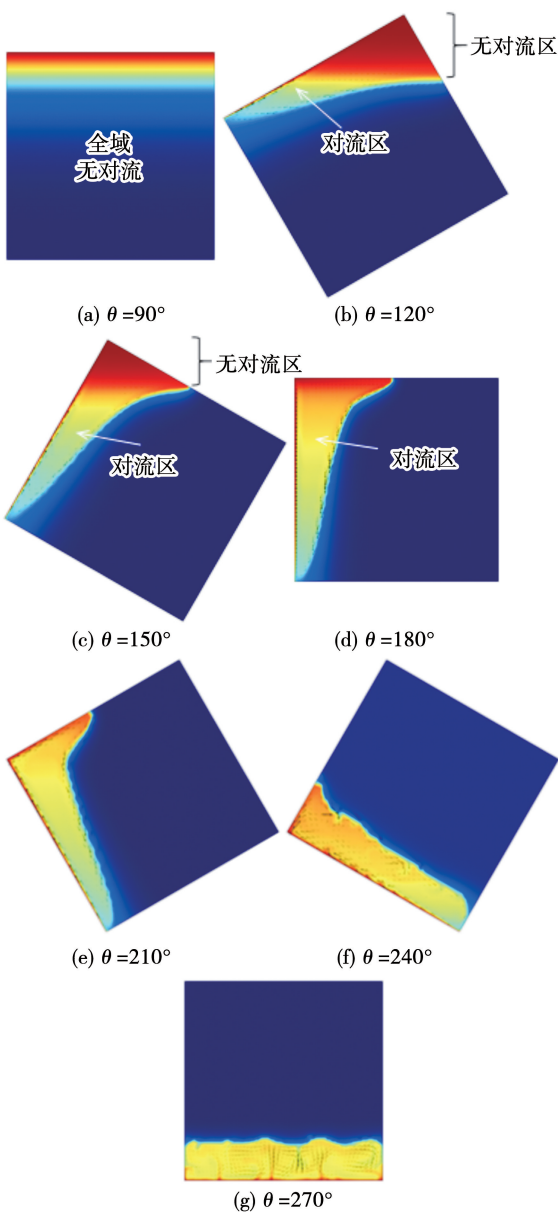


图 9 热源方向对相变石蜡融化过程的影响($f=0.2$)
Fig.9 Influences of heat source direction on melting process of phase change paraffin ($f=0.2$)

由图 8、图 9 可知,在顶部加热时 $\theta=90^\circ$,因加热方向与液相石蜡的浮升力方向正好相反,此时液体石蜡的自然对流运动将会被完全抑制,对应的增强系数 λ 近似为 1。随着热源角度的增加,自然对流效应被逐渐激活,融化前缘也由直线向光滑曲线转变。在 $90^\circ<\theta<180^\circ$ 的区间内,沿着融化前缘顶点做水平线,可将整个液相区将分为无对流和有对流两个区域,见图 9(b)、图 9(c)。待 $\theta=180^\circ$ 时,对应着左侧热源加热,此时液相区内自然运动合并为一个大环流,见图 9(d)。随后,在 $180^\circ<\theta<270^\circ$ 的区间内,液相自然运动将由单一大环流向若干无规则小环流转变,且融化前缘线也变得不规则。待 $\theta=270^\circ$ 时,对应着底部加热情况。此时由于热源方向与浮升力方向保持一致,液相的自然对流效应将被完全激活,形成波浪形的融化前缘特征,并对应着 $\lambda=27.9$ 的最大自然对流增强系数。由此可知,相变材料融化储热过程中的液相自然对流影响存在显著的方向相关性。其中底部热源下的储热效率最高。

3.4 加热温度对自然对流效应的影响

加热温度对自然对流效应的影响如图 10 所示。由图 10(a)可知,在不考虑液相自然对流运动时,在加热面与融化边界间的液相内会产生温度梯度,阻碍热量向融化边界的传输,逐渐降低融化储能速率,形成融化分数与时间的乘幂函数关系,见式(8)。不同加热温度下的拟合系数见表 2。加热温度 T_w 由 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 提升至 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时,对应的总融化时间 t_n 由 $2\,803.3\text{ min}$ 降至 $1\,466.7\text{ min}$,总融化储热效率提升至 1.91 倍。

由图 10(b)可知,在考虑液相的自然运动时,加热面的热量可通过液相自然运动实现向融化边界的无障碍传输,从而保持融化储能速率基本不变,形成融化分数与时间的线性函数关系,见式(9)。不同加热温度下的拟合系数见表 2。相变石蜡的融化分数与融化时间基本呈线性函数关系。加热温度 T_w 由 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 提升至 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时,对应的总融化时间 t_c 由 104.7 min 降至 45.5 min ,总融化储热效率提升至 2.3 倍。

由图 10(c) 可知,加热温度 T_w 由 60 ℃ 提升至 100 ℃ 时,对应的自然对流增强系数 λ 由 26.8 增至 32.2,自然对流增强系数提升了 20%。由此可知,加热温度不仅可以增强热量输送强度,同时可促进液相的自然对流运动,从而达到提升相变石蜡融化储热效率的目的。

表 2 不同加热温度的拟合系数

Tab.2 Fitting coefficients of different heating temperatures

$T_w/^\circ\text{C}$	a	b	c	d
60	0.013 2	0.545 3	0.006 0	0.009 7
70	0.014 8	0.546 6	0.011 2	0.012 8
80	0.016 9	0.541 3	0.020 1	0.015 7
90	0.018 5	0.539 2	0.013 8	0.019 1
100	0.020 2	0.534 6	0.017 7	0.022 7

$f = at^b, \quad 0 < f < 1$ (8)

$f = c + dt, \quad 0 < f < 1$ (9)

3.5 初始温度对自然对流效应的影响

初始温度对自然对流效应的影响如图 11 所示。在不考虑液相自然对流运动时,相变石蜡的融化分数与融化时间基本呈乘幂函数关系,见式 (8),不同初始温度工况下的拟合系数见表 3。初始温度 T_0 由 5 ℃ 提升至 25 ℃ 时,对应的总融化时间 t_n 由 2 393.3 min 降至 2 118.3 min,总融化储热效率提升至 1.3 倍。

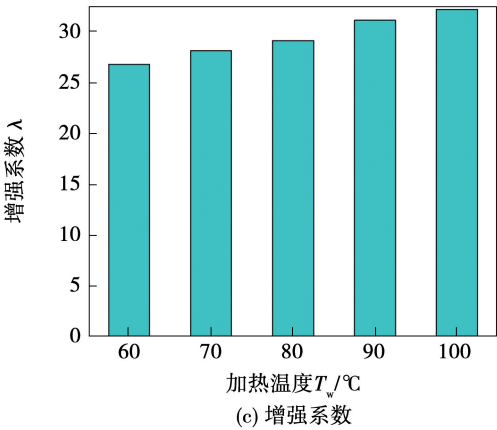
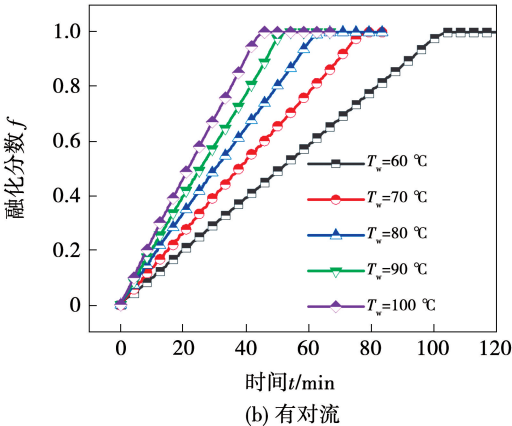
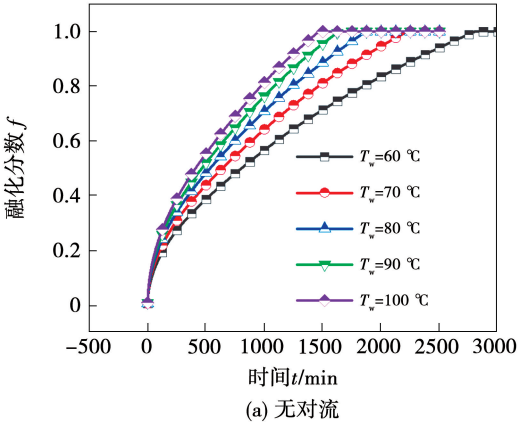
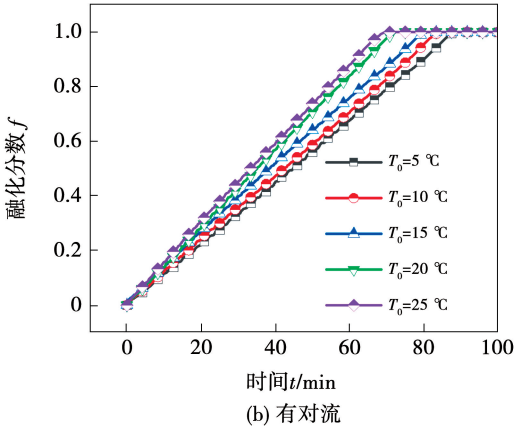
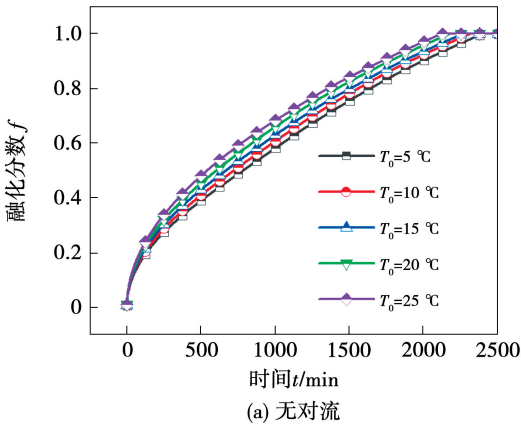


图 10 加热温度对自然对流效应的影响
Fig.10 Influences of heating temperature on natural convection effect



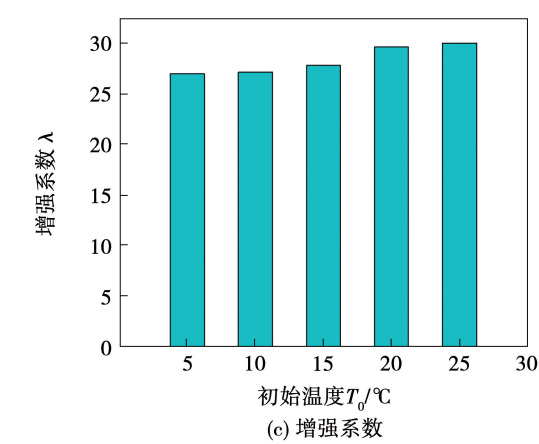


图 11 初始温度对自然对流效应的影响

Fig. 11 Influences of initial temperature on natural convection effect

在考虑液相的自然运动时,相变石蜡的融化分数与融化时间基本呈线性函数关系,见式(9),不同初始温度工况下的拟合系数 c 、 d 见表3。初始温度 T_0 由5℃提升至25℃时,对应的总融化时间 t_c 由88.7 min降至70.5 min,总融化储热效率提升至1.26倍。由图11(c)可知,初始温度 T_0 由5℃提升至25℃时,对应的自然对流增强系数 λ 由26.99增至30.05,自然对流增强系数提升了11.3%。相变石蜡初始温度变化优先影响着固相阶段的显热储存,从而减缓了对融化过程中潜热储能的影响。

表 3 不同初始温度的拟合系数

Tab. 3 Fitting coefficients of different initial temperature

$T_0/^\circ\text{C}$	a	b	c	d
5	0.009 6	0.596 9	0.001 2	0.011 3
10	0.011 4	0.578 1	0.005 5	0.011 8
15	0.013 9	0.554 0	0.023 7	0.012 3
20	0.016 7	0.533 0	0.008 8	0.013 9
25	0.020 7	0.506 7	0.016 6	0.014 4

4 结 论

针对相变材料融化储热中的自然对流增强效应问题开展研究,通过开展试验测试和理论分析,得出以下结论:

- (1) 左侧恒定热源下,方腔内相变石蜡融化储热过程中的融化前缘呈倾斜状,该倾斜分布特征是由温差驱动下的液相自然对流运动传热所引起的。
- (2) 采用本文建立的相变材料融化储热计算模型预测的相变石蜡总融化储热时间与试验记录的结果误差为5.6%,两者获取的相变石蜡融化前缘倾斜分布发展规律也基本一致。
- (3) 相变石蜡融化储热过程中的自然对流运动传热增强效应存在尺寸效应,在方腔尺寸小于2 mm时,其影响基本可忽略不计。
- (4) 相变石蜡融化储热过程中的自然对流运动传热增强效应存在方向相关性。在 $\theta = 90^\circ$ 的顶部热源下,液相的自然对流运动将被完全抑制。随着 θ 的增大,自然对流增强效应将逐渐被激活,液相流动状态将由单一大环流向若干无规则小环流转变,并在 $\theta = 270^\circ$ 时达到最大增强系数27.9。
- (5) 加热温度由60℃提升至100℃时,自然对流增强系数提升了20%。初始温度由25℃降至5℃时,自然对流增强系数降低了10.2%。
- 参考文献:
- [1] 王梅杰,刘伟杰,王佳丽,等.管壳式相变蓄热换热器的研究进展[J].热能动力工程,2023,38(10):1-12.
- WANG Meijie, LIU Weijie, WANG Jiali, et al. Research progress of shell-and-tube heat exchanger of latent heat storage[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(10): 1-12.
- [2] 孙义文,王子龙,张 华,等.太阳能相变蓄热水箱性能实验研究[J].热能动力工程,2019,34(11):109-115.
- SUN Yiwen, WANG Zilong, ZHANG Hua, et al. Experimental study on performance of solar energy phase-change heat storage tank [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(11): 109-115.
- [3] 李成宇,郭雪岩,李 春.多区相变材料填充床储热性能数值分析[J].热能动力工程,2023,38(11):90-97.
- LI Chengyu, GUO Xueyan, LI Chun. Numerical analysis of heat storage performance of packed bed of PCMs with multi-layer configuration[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(11): 90-97.
- [4] 宋 爽,李 福,唐西胜.锂离子电池安全状态评估研究进展[J].储能科学与技术,2023,12(11):3545-3555.

SONG Shuang, LI Fu, TANG Xisheng. Research progress on the safety-state assessment of lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(11): 3545 – 3555.

[5] MALLYA N, HAUSSENER S. Buoyancy-driven melting and solidification heat transfer analysis in encapsulated phase change materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 16(4): 120525.

[6] SELVAKUMAR R, VENGADESAN S. Combined effects of buoyancy and electric forces on non-isothermal melting of a dielectric phase change material [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2022, 15(1): 104029.

[7] MOENCH S, DITTRICH R. Influence of natural convection and volume change on numerical simulation of phase change materials for latent heat storage[J]. Energies, 2022, 15(8): 2746.

[8] CAO S, WANG H. Characterization of size effect of natural convection in the melting process of phase change material in square cavity[J]. Chinese Physics B, 2021, 30(10): 370 – 379.

[9] 句子涵, 于坤洋, 李 强, 等. 石墨/铝合金复合导热板强化石蜡相变蓄热研究 [J]. 工程热物理学报, 2023, 44 (12): 3399 – 3406.

JU Zihan, YU Kunyang, LI Qiang, et al. Study on graphite/aluminum alloy composite heat conducting plate for enhancing paraffin phase change heat storage[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(12): 3399 – 3406.

[10] KUMAR P, MVLSAMY K, PRAKASH K, et al. Investigating thermal properties of nanoparticle dispersed paraffin (NDP) as phase change material for thermal energy storage[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45(3): 745 – 750.

[11] KANT K, BIWOLE P, SHUKL A, et al. Heat transfer and energy storage performances of phase change materials encapsulated in honeycomb cells[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 38 (2): 102 – 117.

[12] SELVAKUMAR R, VENGADESAN S. Combined effects of buoyancy and electric forces on non-isothermal melting of a dielectric phase change material [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2022, 15(1): 104 – 119.

[13] ZHANG S, FENG D, SHI L, et al. A review of phase change heat transfer in shape-stabilized phase change materials based on porous supports for thermal energy storage[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 13(5): 110 – 127.

[14] TYAGI V, CHOPRA K, SHARMA R, et al. A comprehensive review on phase change materials for heat storage applications; Development, characterization, thermal and chemical stability [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 23(4): 111 – 123.

[15] CHEN J. Dynamic characteristics of phase change material in a square cavity under various heating modes [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 12(3): 1 – 10.

(丛 敏 编辑)