

方腔蓄热模型优化及蓄热过程数值模拟研究

范晶^{1,2}, 王豪¹, 崔斌¹, 宋粉红¹

(1. 东北电力大学能源与动力工程学院, 132012, 吉林 吉林;

2. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为研究方腔式蓄热单元内有机相变材料融化过程的传热规律,数值模拟了不同体积分数石墨烯纳米片填充下复合相变材料融化过程的液相分数和努塞尔数的变化;针对方腔蓄热单元热量在顶端聚集的问题,构建了分层模型,模拟了不同模型中复合相变材料的融化过程。结果表明:当石墨烯纳米片体积分数分别为1%、3%和5%时,复合相变材料完全融化时间分别为32.1、20.0、17.5 min,与纯质石蜡相比,融化时间分别缩短了70.47%、81.62%和83.92%;方腔上下等分时,融化时间相比于未分层时缩短11.88%;将方腔上下部分别填充体积分数1%与5%的复合相变材料,相比于未分为层时,整体填充3%的复合相变模型融化时间缩短了25.83%。由模拟结果可得,在石蜡中添加石墨烯纳米片可以使其导热性能有很大程度的提高,同时黏度增长程度较小,对自然对流产生的影响也比较小。综合考虑可以发现,在石蜡中添加石墨烯纳米片可以强化其传热性能;分层模型可以缩短相变材料融化时间,合适的填充方案能够进一步加快矩形方腔的融化过程。

关键词: 相变蓄热; 纳米颗粒; 数值模拟; 结构优化

中图分类号: 文献标志码:

DOI: 10.7652/xjtuxb202303004 **文章编号:** 0253-987(2023)03-0047-11

Effect of Internal Partition in Square Cavity Unit on Heat Storage Process of Phase Change Material

FAN Jing^{1,2}, WANG Hao¹, CUI Bin¹, SONG Fenhong¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin, Jilin 132012, China;

2. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to research the heat transfer problem of organic phase change materials melting in the square cavity heat storage unit, liquid fraction and mean Nusselt number of composite phase change materials under different filling rates during melting are analyzed. To solve the problem of heat accumulation at the top of the square cavity unit, the layered model is constructed to simulate the melting process of the composite phase change materials in different models. The results show that when the contents of graphene nanosheets are 1%, 3% and 5%, the complete melting times of the nanoparticle-enhanced phase change material are 32.1, 20.0 and 17.5 min, respectively, which are 70.47%, 81.62% and 83.92% shorter than those of pure paraffin. When the square cavity is equally divided at the top and bottom, the melting time is reduced by 11.88% compared to the unlayered one. When the upper and lower parts of the square cavity are

收稿日期: 2022-06-16。 作者简介: 范晶(1984—),女,教授;宋粉红(通信作者),女,教授。 基金项目: 吉林省自然科学基金资助项目(20200201223JC);热流科学与工程教育部重点实验室开放基金资助项目(KLTFS2018KFJJ03)。

网络出版时间: 2022-11-22

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20221122.0815.002.html>

filled with 1% and 5% volume fraction of the composite phase change materials respectively, the melting time of the composite phase change model with an overall filling of 3% is reduced by 25.83% compared to that when it is not divided into layers. From the simulation results, it can be concluded that the addition of graphene nanosheets to paraffin wax can lead to a large degree of improvement in its thermal conductivity, as well as a smaller degree of viscosity growth and a smaller effect on natural convection. When considered together, it can be found that the addition of graphene nanosheets to paraffin can strengthen its heat transfer performance; the layered model can shorten the melting time of the phase change materials, and a suitable filling scheme can further accelerate the melting process of the rectangular cavity.

Keywords: phase change heat storage; nanoparticles; numerical simulation; structural optimization

在能源转换和利用中,存在供求时空不匹配矛盾。热能储存技术(thermal energy storage, TES)^[1]通过介质在能量产出多余时将其存储,并在外界需要时将其释放,是提高能源利用率和保护环境的有效手段之一^[2]。其中,潜热蓄热技术(latent heat storage, LHS)^[3]是利用相变材料(phase change material, PCM)在相变过程中,吸收或放出相变潜热来进行能量储存与释放的技术。潜热储能的储能密度高,且在储能过程中材料温度近似恒定,是一种极具竞争力的储能方式,在航空航天、制冷低温、电子元件散热及太阳能利用等领域都有着广泛的应用前景。

蓄热材料分为有机类、无机类和混合类^[4]。常用的有机相变材料通常具有较差的热导性,严重影响其蓄热效率,也限制其实际应用^[5-6]。将纳米粒子添加到传统相变材料中形成复合相变材料(nanoparticle enhanced phase change material, NEPCM),具有强化相变材料传热、提升蓄热系统效率的作用^[7-12]。石墨烯具有高热导率、比表面积大的特点^[13],将其加入相变材料中可以提高相变材料的传热性能^[14-16]。Sicasankaran^[17]发现在月桂酸中添加体积分数为1%的石墨烯纳米片能将导热系数提高230%;Li等^[18-19]以硬脂酸为相变材料,通过添加多壁碳纳米管、石墨烯纳米片、纳米石墨片等碳材料制备了多种复合相变材料,发现同组体积组分的纳米石墨片导热强化效果最佳,添加多壁碳纳米管能够有效提高硬脂酸的导热性能,但是会降低复合相变材料融化过程中液相的对流效应。Nitesh等^[20]基于Maxwell-Garnett type effective medium theory (EMT)模型和焓-多孔介质模型分析了填充不同类型纳米基复合相变材料的套管式储热系统的储能过程。

目前纳米材料强化蓄热效果的研究大多集中在材料制备、物性测试、性能试验等方面,而结合纳米颗粒对相变材料融化过程的影响,对蓄热单元进行结构优化以实现更高蓄热效率的研究较少。本文基于方腔式蓄热单元,以石蜡为相变材料,基于EMT模型研究了不同体积分数的石墨烯纳米片对其蓄热过程的强化作用,并在此基础上构建了分层式方腔模型,研究不同隔板位置、层数及复合相变材料的填充方式时蓄热效果的差异,通过分析不同状态下蓄热单元的融化时间,得出了方腔式蓄热单元内隔板的最佳位置及复合相变材料的最佳填充方式,完成了对矩形方腔式蓄热单元的优化。

1 模型建立

1.1 方腔式蓄热单元模型及设置

1.1.1 方腔式蓄热单元物理模型及初始条件

本文以方腔式蓄热单元为研究模型(图1),考虑到热量沿加热面垂直的方向传递,因此将三维方腔模型简化为二维。选用40 mm长、40 mm宽的二维方腔模型,采用结构化网格对模型进行划分,内部填充材料为石蜡及添加不同体积分数石墨烯纳米片(Gnp)的复合相变材料,初始温度为300 K,右侧壁

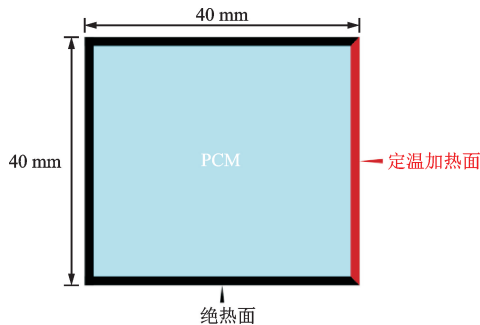


图1 矩形方腔模型图

Fig. 1 Simulation model of rectangular square cavity

面为定温加热面且温差为 20 K,其余壁面为绝热面,忽略壁面厚度。密度采用 Bossinesq 假设,重力方向沿 y 轴负方向竖直向下,模型内部相变材料初始速度为 0 m/s,初始状态保持为固态。

将 Gnp 加入石蜡中,复合相变材料的密度 ρ_{nepcm} 、潜热 L_{nepcm} 、比定压热容 $c_{p,\text{nepcm}}$ 和热膨胀系数 β_{nepcm} 分别通过以下公式计算

$$\rho_{\text{nepcm}} = (1 - \varphi)\rho_{\text{pcm}} + \varphi\rho_{\text{nano}} \tag{1}$$

$$L_{\text{nepcm}} = \frac{(1 - \varphi)\rho_{\text{pcm}}L_{\text{pcm}}}{\rho_{\text{nepcm}}} \tag{2}$$

$$c_{p,\text{nepcm}} = \frac{(1 - \varphi)\rho_{\text{pcm}}c_{p,\text{pcm}} + \varphi\rho_{\text{nano}}c_{p,\text{nano}}}{\rho_{\text{nepcm}}} \tag{3}$$

$$\beta_{\text{nepcm}} = \frac{(1 - \varphi)\rho_{\text{pcm}}\beta_{\text{pcm}} + \varphi\rho_{\text{nano}}\beta_{\text{nano}}}{\rho_{\text{nepcm}}} \tag{4}$$

式中: ρ_{pcm} 、 ρ_{nano} 、 L_{pcm} 、 L_{nano} 、 $c_{p,\text{pcm}}$ 、 $c_{p,\text{nano}}$ 和 β_{pcm} 、 β_{nano} 分别是相变材料和石墨烯纳米片的密度、潜热、比定压热容和热膨胀系数。

动力黏度 μ 根据 Krieger-Dougherty 模型计算

$$\mu = \mu_{\text{pcm}} \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{\text{max}}}\right)^{-Q_{\varphi_{\text{max}}}} \tag{5}$$

式中: μ_{pcm} 为相变材料动力黏度; φ_{max} 为最大填充因子, Q 为特性黏度,对于石墨烯纳米片,二者分别为 0.632 和 2.5^[20-21]。

Harish^[17] 提出了适用于 Gnp 的 EMT 模型,通过此模型可以得到复合纳米相变材料的导热系数

$$k_{\text{eff}} = k_{\text{pcm}} \frac{3 + \varphi[2\chi_{11}(1 - L_{11}) + \chi_{33}(1 - L_{33})]}{3 - \varphi[2\chi_{11}L_{11} + \chi_{33}L_{33}]} \tag{1}$$

$$\chi_{11} = \frac{k_{11}^c - k_{\text{pcm}}}{k_{\text{pcm}} + L_{11}(k_{11}^c - k_{\text{pcm}})} \tag{2}$$

$$\chi_{33} = \frac{k_{33}^c - k_{\text{pcm}}}{k_{\text{pcm}} + L_{33}(k_{33}^c - k_{\text{pcm}})} \tag{3}$$

$$L_{11} = \frac{a_s^2}{2(a_s^2 - 1)} - \frac{a_s}{2(a_s^2 - 1)^{\frac{3}{2}}} \text{arcosh}a_s \tag{4}$$

$$L_{33} = 1 - 2L_{11} \tag{5}$$

式中: k_{pcm} 为相变材料的导热系数; L_{11} 和 L_{33} 为 Gnp 的形状因子; a_s 为 Gnp 的长径比。Gnp 直径为 1 μm ,长为 1 nm,因此 $a_s = 0.001$ 。 k_{11}^c 和 k_{33}^c 通过以下公式计算得到

$$k_{ii}^c = \frac{k_{\text{nano}}}{(1 + \gamma L_{ii}(k_{\text{nano}}/k_{\text{pcm}}))} \quad i = 1, 3 \tag{6}$$

$$\gamma = (1 + 2a_s) \frac{R_{\text{con}}k_{\text{pcm}}}{l} \tag{7}$$

式中: k_{nano} 为相变材料的导热系数; R_{con} 为 Gnp 和石蜡的接触热阻,其值根据文献方法^[22] 计算。

不同体积分数下的复合相变材料物性参数如表 1 所示。

表 1 复合纳米材料的物性参数

Table 1 Physical property parameters of composite nanomaterials

物性参数	PCM	Gnp 体积分数/%		
		1	3	5
$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	750.0	764.5	793.5	822.5
$k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.150	0.340	0.731	1.090
$c_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	2 630.0	2 610.0	2 570.4	2 530.6
β / K^{-1}	0.001 00	0.000 99	0.000 97	0.000 95
$L / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	17 600	174 240	170 720	167 200

在模拟相变问题时,采用焓-孔隙法并对数学模型做出以下假设:

- (1) PCM 属于均质材料且各向同性;
- (2) PCM 的密度采用 Bossinesq 假设,即仅在考虑浮升力的影响时才计算流体内密度的变化;
- (3) 相变过程中忽略固体沉降;
- (4) 融化后所得的 PCM 为不可压缩牛顿流体;
- (5) 忽略 PCM 流体的黏性耗散和接触热阻。

1.1.2 模型设置

本文通过 Fluent 中的融化/凝固模型对复合相变材料的融化及凝固过程进行了模拟。该数值解法基于有限体积法,在迭代求解的过程中,对流项采用二阶迎风格式,速度-压力的耦合项离散采用 SIMPLE 算法进行离散,压力项采用 PRESTO 算法进行离散。在整个非稳态数值求解过程中,压力、速度、能量和液体分数的松弛因子分别设置为 0.3、0.6、1 和 0.9,连续性方程和动量方程的残差设置为 10^{-3} ,能量方程的残差设置为 10^{-6} 。

1.2 求解方程

1.2.1 相变传热方程

在求解相变传热问题时,采用焓-多孔介质的求解思路,将固液相交界面的糊状区域视作“非真实的”多孔介质处理,并将计算区域的液相率 f 用多孔介质的孔隙率 λ 表示,这种对于相变问题的处理方式可间接求解糊状区域的位置。

PCM 的焓为

$$H = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT + fL \tag{8}$$

式中: c_p 为比定压热容; L 为相变潜热; h_{ref} 为参考焓; f 为 PCM 区域液相率,表示为

$$f = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, & T_s \leq T \leq T_l \\ 1, & T > T_l \end{cases} \quad (9)$$

式中: T_s 和 T_l 分别为 PCM 的固相线和液相线温度。

同时,在固液交界面的糊状区域,控制方程中的速度通过表面流速 u 表示,将其定义为

$$u = \lambda u_1 \quad (10)$$

式中: λ 是孔隙率; u_1 为流体实际速度。

1.2.2 控制方程

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

(2) 动量方程。 x 方向

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho u u) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_x \quad (12)$$

y 方向

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho v v) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial P}{\partial y} + S_y + S_b \quad (13)$$

(3) 能量方程

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho u h) = \text{div}(\lambda \text{grad} T) - S_h \quad (14)$$

式中: u 和 v 分别为速度在 x 和 y 方向上的分量; S_x 和 S_y 分别为糊状区的源项,它可以将固态区、液态区和糊状态区的动量方程在形式上统一起来,从而对流场整体进行求解,可表示为

$$S_x = -\omega u \quad (15)$$

$$S_y = -\omega v \quad (16)$$

其中 ω 为阻力系数

$$\omega = -C(1-f) \quad (17)$$

C 为糊状区系数,其值取决于多孔介质的类型,本文取为 10^6 ; S_b 为浮升力项,可以表示自然对流对相变过程的影响,并且仅在浮升力项中考虑密度的变化,将其表示为

$$S_b = \rho g \beta (T - T_{\text{ref}}) \quad (18)$$

其中 β 为膨胀系数, T_{ref} 是参考温度。

2 CFD 计算及结果分析

2.1 算法验证

本文数值模拟结果与 Kamkari 等^[23] 的方腔融化实验进行了对比,文献[23]实验研究了几何尺寸

为 120 mm 长、50 mm 宽、120 mm 高的方腔单元。蓄热器内液相率随时间变化的特征曲线如图 2 所示。可以发现二者在融化过程中固液界面变化基本相同,且由于模拟所采用的边界条件为完全绝热的理想边界条件,而实验中有一定的热量损失,因此模拟结果比实验结果融化速度稍快。根据图 2 可以发现,在整个融化过程中二者偏差在 10% 的范围内,因此证明了模拟所采用算法的正确性。

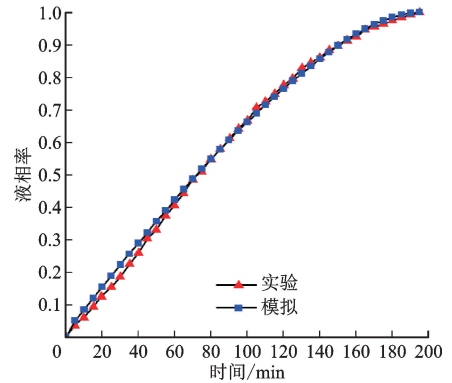


图 2 数值模拟与实验的液相率对比图

Fig. 2 Comparison of liquid phase ratio obtained between numerical simulation and the experiment

本次模拟中分别构建了 9 747、12 210 和 14 351 网格数的模型以评估网格的独立性,当网格数量达到 12 210 时,继续细化网格数值模拟结果基本不发生变化,因此选择网格数为 12 210 的模型;采用 0.05、0.1 和 0.2 s 的时间步长,当时间步长为 0.1 s 时可确保迭代过程完全收敛且计算结果与时间步长为 0.05 s 时基本一致,因此最终选择步长为 0.1 s。网格无关性如图 3 所示,时间步长无关性如图 4 所示。

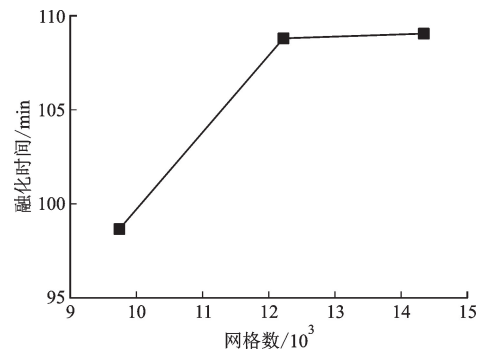


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid-independent validation

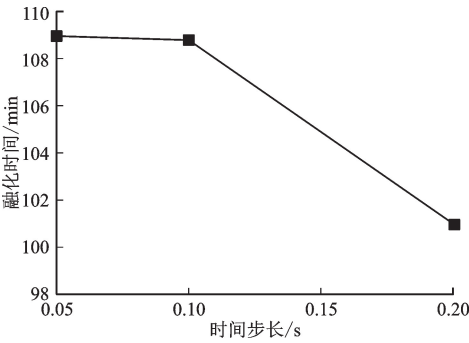


图 4 时间步长无关性验证

Fig. 4 Time-step-independent validation

2.2 模拟结果分析

2.2.1 石墨烯纳米片对融化效果的影响

图 5 为矩形方腔融化过程。在加热的最初阶段,热量主要通过热传导的方式向相变材料内部传递;一段时间后,在相界面与加热表面间的液体相变材料中形成稳定的温度梯度,进而形成密度差,在其内部出现自然对流,此时换热形式发生本质性的改变。温度较高的液体相变材料聚集到单元上方,而温度较低的则沿相界面沉降到单元下方。高温相变材料在单元上方的聚集不断加速上方相变材料的融化,也导致热量在上方不断以显热方式被吸收。融化到 80 min 时,顶端高温相变材料约占整个方腔的 70%。

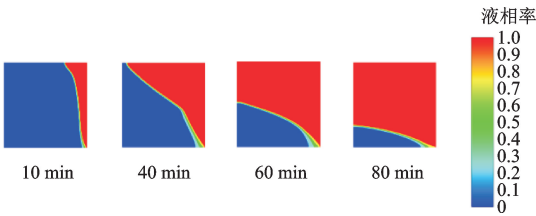


图 5 石蜡融化过程的液相率云图

Fig. 5 Cloud map of the liquid phase rate of paraffin in the melting process

图 6 为在石蜡中分别添加体积分数为 1%、3% 和 5% 的 Gnp 所形成的复合相变材料在 5、10、15 min 时的液相率云图。根据复合相变材料的物性参数可以发现,加入石墨烯纳米片之后,复合相变材料导热系数提升效果较为明显,且黏度也在一定程度上也有所增加,导热系数的增加可以有效的提高石蜡的传热性能,而黏度的增加则会对自然对流产生一定的抑制作用。

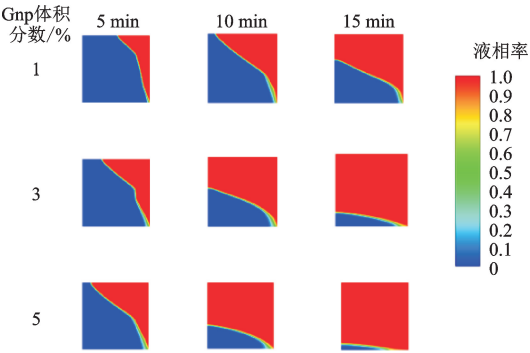


图 6 复合相变材料融化过程液相率云图

Fig. 6 Cloud map of the liquid phase rate of NEPCM in the melting process

图 7 所示为不同体积分数的 NEPCM 融化过程中液相率随时间变化的曲线。添加体积分数为 1%、3% 和 5% 的 Gnp 所得到的 NEPCM 完全融化所需时间分别为 32.1、20.0 和 17.5 min,与纯质石蜡完全融化时间 108.8 min 相比,分别缩短了 70.47%、81.62% 和 83.92%。在石蜡中添加 Gnp 可以使其导热性能有很大程度的提高,同时黏度增长程度较小,对自然对流产生的影响也比较小。综合考虑可以发现,在石蜡中添加 Gnp 可以强化其传热性能,同时并不会改变 PCM 的融化趋势,这是由于石墨烯纳米片与石蜡只是物理结合,二者并未发生化学反应。

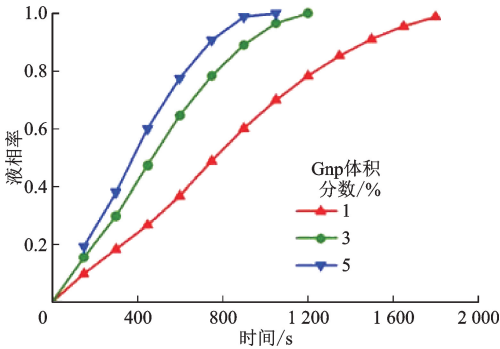


图 7 复合相变材料融化过程液相组分变化

Fig. 7 Time evolution of the liquid phase components in the melting process of NEPCM

努塞尔数 Nu 是一个反映对流换热强度的无量纲准则数。图 8 所示为石蜡及 Gnp 体积分数为 1%、3% 和 5% 的 NEPCM 努塞尔数随时间变化的曲线。在不同的 Gnp 体积分数下, Nu 变化趋势是相同的,它们之间的差异主要体现在时间以及强弱

程度上。整体来看, Nu 变化分为 3 个阶段, 在第一阶段中, 初始融化的液体层极薄, 此时热阻极小, 对流换热强度远低于导热, 传热主要以导热方式进行, Nu 较大, 随着融化过程的进行, 融化的液态 NEPCM 逐渐增多, 液体层逐渐增厚导致导热热阻增大, Nu 迅速下降。第二阶段对流效果逐渐增强, 对流强化所带来的积极影响与液相 NEPCM 热阻增大所带来的消极影响相持平, Nu 基本保持稳定且出现小幅增长的现象, 随着石墨烯纳米片体积分数的提高, 增长幅度减小, 这是由于石墨烯纳米片的加入增大了复合纳米相变材料的黏度, 在一定程度上减弱了其对流强度, 随着 Gnp 体积分数的增加, 平稳期的 Nu 逐渐降低。第三阶段中固液相交界面长度降低, 并且随着融化的进行, 对流强度逐渐降低, 液相区的热阻作用增强, 因此 Nu 再次降低。

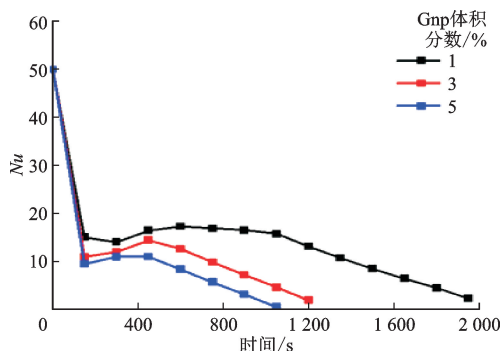


图 8 复合相变材料融化过程努塞尔数变化

Fig. 8 Time evolution of Nu in the melting process of NEPCM

2.2.2 隔板位置对融化效果的影响

在矩形方腔中, 高温和低温 PCM 流体分别向上、下部汇聚, 这种差异性分布导致融化后期热量不断在方腔顶端聚集, 并且会导致外界输入的热量更多以显热的形式被顶端聚集的高温液态 PCM 吸收。本文通过加入隔板的方式将矩形方腔分为上下两部分, 将下部顶端位置高温 PCM 的热量通过隔板传递至上部底端的固态 PCM 中, 将这部分热量以潜热的形式吸收。同时, 考虑隔板层数及在不同层中填充不同体积分数的 NEPCM, 研究分层数量及 NEPCM 填充方案对融化效果的影响。

本节研究了隔板的位置对矩形方腔内 PCM 融化效果的影响。在矩形方腔模型的基础上加入隔板, 隔板垂直于加热面放置, 将矩形方腔内 PCM 分为上下两部分, 它们之间可以通过隔板传递热量, 如图 9 所示。假设矩形方腔竖直方向高度为 y , 隔板

距离矩形方腔顶端为 y_c , 令 $r = y_c/y$, 分别研究了 $r=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ 五种比例下矩形方腔内的融化情况, 所选择的 PCM 材料和纳米材料与上节相同, 初始温度为 279 K, 右壁面为定温加热面且 $T=293$ K, 其余 3 面为绝热面。

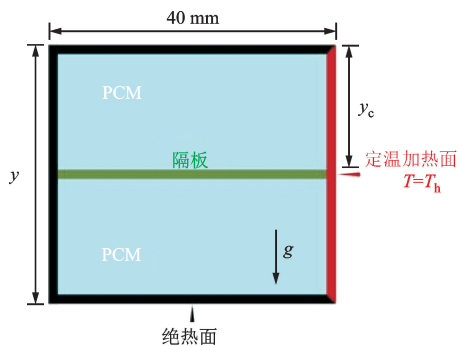


图 9 矩形分层模型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the rectangular stratified model

图 10 为不同隔板位置时液相率随时间的变化曲线。随着隔板位置向下移动, PCM 整体融化速度先增大后减小, 当 $r=0.5$ 时, 融化速度最快。在前 1 000 s 内, 5 种隔板位置所对应的融化速度基本相同, 这是由于融化前期对流作用较小, 下部 PCM 顶端区域由自然对流作用聚集的高温流体也较少, 因此它对上方 PCM 底端的影响效果也比较小。在 1 000~4 000 s 范围内, 当 r 从 0.1 增大到 0.5 的过程中, 液相率增大较为明显, 随着 r 的继续增大, 融化速度逐渐降低, 且 r 越大时, 融化速度降低的效果越明显。这是由于 r 从 0.1 增大到 0.5 的过程中, 下部 PCM 对上部 PCM 影响作用变化较明显, 当 r 继续增大时, 限制融化速度的因素由上部转变为下部。除 $r=0.9$ 的隔板位置外, 其他情况液相率随时间的变化趋势相同, 当 $r=0.9$ 时, 后期融化速率降

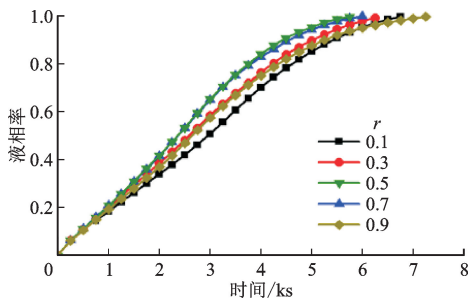


图 10 不同隔板位置时液相率随时间的变化

Fig. 10 Time evolution of the liquid phase rate in the cases with partition at different positions

低较为明显。这是由于下部 PCM 区域高度较小,较低的高度抑制了自然对流的强度,融化所需要的时间较长,因此整体方腔融化所需要的时间也延长。

图 11 表示当 r 为不同值时融化所需时间,其中红色水平线表示无隔板状态时 PCM 融化所需的时间。当 $r=0.1,0.9$ 时,它们完全融化所需要的时间分别为 112.5 和 120.8 min,相比于无隔板状态时的 108.8 min,分别延长了 3.4% 及 11.06%;当 $r=0.9$ 时融化所需的时间最长,这是由于下端 PCM 融化较慢,拖延了整体的融化时间。当 $r=0.3,0.5,0.7$ 时,融化时间分别为 104.2、95.9 和 100.0 min,相比于无隔板状态时的融化时间分别缩短了 4.26%、11.88% 和 8.09%,三者融化时间较为接近,且相比于无隔板状态融化速度都有不同程度的加快。

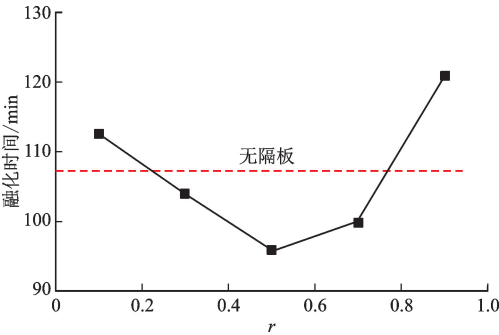


图 11 不同隔板位置时融化所需的时间

Fig. 11 Time required for melting in the cases with partition at different positions

图 12 和图 13 分别为 $r=0.1,0.5,0.9$ 时不同阶段下的液相率云图和温度云图。通过液相率云图可以发现,矩形方腔被隔板分为上下两部分之后,在自然对流作用下,上下两部分都出现顶部比底部融化快的现象。随着融化过程的进行,上部 PCM 底端受到下部顶端温度较高流体的加热作用,原本属于底端的低温聚集区域开始融化,同时发生自然对流的区域逐渐扩大,最终加快了上部 PCM 区域的融化速度。对比 3 种不同的隔板位置,可以发现当 $r=0.1$ 时,下部 PCM 所起到的作用较小,不能充分利用下部 PCM 顶端的热量;当 $r=0.9$ 时,下部 PCM 融化较慢,使方腔整体融化时间变长,当隔板位于矩形方腔中部时,可以充分发挥下部 PCM 的作用,融化效果达到最好。

通过不同时刻的温度云图对 $r=0.1,0.5,0.9$ 三种隔板位置下的融化过程进行分析,发现当融化进行到 30 min 时,三者的差距逐渐变得明显。对比

$r=0.1$ 和 $r=0.5$ 时两种隔板位置,可以发现 $r=0.1$ 时上部 PCM 已经充分吸收下部 PCM 顶端的热量,导致上部 PCM 平均温度更高,下部顶端温度明显高于 $r=0.5$ 时的温度。当融化进行到 80 min 时, $r=0.5$ 的模型未融化的 PCM 最少, $r=0.9$ 时,由于下部区域高度较小,自然对流程程度较弱,因此下部 PCM 融化速度较慢,导致 80 min 时下部剩余的 PCM 依旧较多,对比 3 种情况可以发现 $r=0.5$ 时融化效果最好。

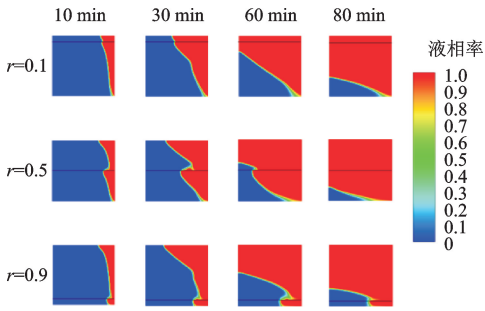


图 12 不同隔板位置时单元融化界面变化图

Fig. 12 Melting interface of the unit cell in the cases with partition at different positions

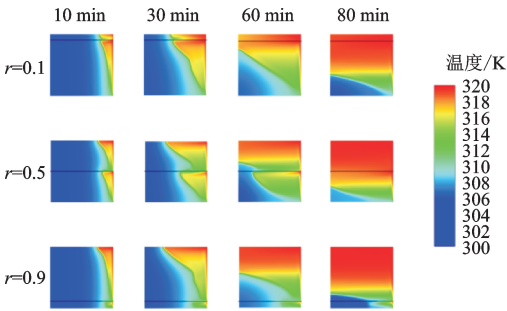


图 13 不同隔板位置时单元温度变化图

Fig. 13 Changing diagram of unit temperature in the cases with partition at different positions

2.2.3 单隔板填充方式对融化效果的影响

在单隔板的基础上考虑不同体积分数的 NEPCM 填充方式对融化效果的影响。根据上节内容,选取 $r=0.5$ 的模型进行研究,矩形方腔上部和下部分别按照以下 3 种方案进行填充:(a)上部 Gnp 体积分数为 3% 的 NEPCM,下部 Gnp 体积分数为 3% 的 NEPCM;(b)上部 Gnp 体积分数为 1% 的 NEPCM,下部 Gnp 体积分数为 5% 的 NEPCM;(c)上部 Gnp 体积分数为 5% 的 NEPCM,下部 Gnp 体积分数为 1% 的 NEPCM。这样的填充方式可以使 Gnp 的使用量与体积分数为 3% 的无隔板状态时

保持一致,从而研究在纳米材料体积分数一定的情况下,NEPCM 的填充方式对融化效果的影响。

图 14 所示为 3 种填充方案下融化进行到不同阶段时的温度云图。当 $t=5\text{ min}$ 时,不同方案融化状态不同,方案(b)下部填充 Gnp 体积分数为 5% 的 NEPCM,融化速度明显比其他两种方案快。当 $t=10\text{ min}$ 时,方案(c)上部已经基本完成融化,而方案(b)下部融化最快,上下部分 NEPCM 融化速度最接近。 $t=15\text{ min}$ 时,方案(a)和方案(c)上部平均温度明显高于方案(b)。对比 3 种 NEPCM 填充方案,可以发现方案(b)在融化后期温度分布更加均匀,从加热边界输入的热量更多以潜热的方式被 NEPCM 吸收,能量利用效率更高。

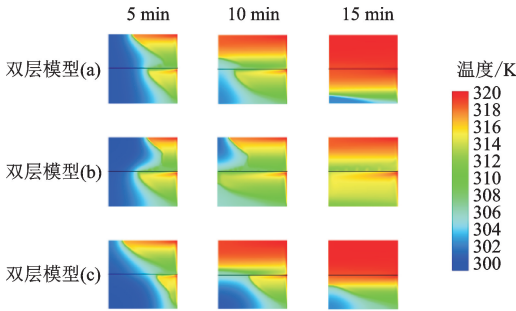


图 14 单隔板模型融化过程温度云图

Fig. 14 Cloud diagram of temperature in the melting process of the single partition model

图 15 所示为 3 种情况下矩形方腔内 NEPCM 液相率随时间的变化。在融化前期,与 Gnp 体积分数为 3% 未加隔板的模型相比,隔板的加入使整体融化速度加快,同比可提高 7% 左右。对比 3 种不同的填充方案,发现在前 200 s 内它们的融化速度基本相同,当液相率达到 80% 时融化速度开始出现差异。方案(c)融化速率最早开始减慢,这是由于上部 Gnp 体积分数为 5% 的 NEPCM 融化速度较快,上部比下部更早完成融化,因此下部融化速度较慢的 Gnp 体积分数为 1% 的 NEPCM 延长了整体的融化时间;方案(a)和(b)在液相率达到 80% 时出现差异,其中方案(b)下部 Gnp 体积分数为 5% 的 NEPCM 融化更快,因此其对上方 Gnp 体积分数为 1% 的 NEPCM 底端加热效果更好,融化效果也达到最佳。填充方案(a)、(b)和(c)完全融化时间分别为 1 065、890 和 1 517.5 s,相比于体积分数为 3% 未加隔板时的融化时间 1 200 s,方案(a)、(b)分别缩短了 11.25% 和 25.83%,而方案(c)延长了 26.46%。因此,NEPCM 的填充方式对于融化过程也有重要

的影响,对带有隔板的分层模型采用合适的填充方案能够进一步加快矩形方腔的融化。

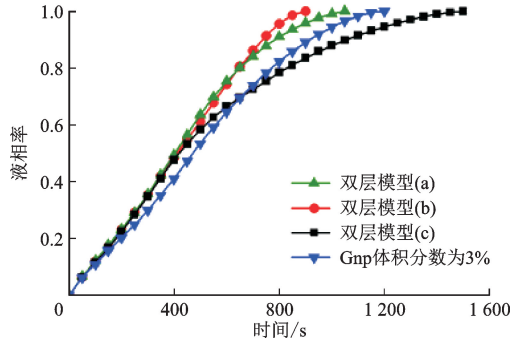


图 15 单隔板模型液相率曲线图

Fig. 15 Liquid phase ratio curve of the single-partition model

矩形方腔中整体的平均温度也是评价其融化效果的重要指标。由于潜热蓄热方式在吸收热量时温度保持不变,并且能量密度远高于显热蓄热方式,因此研究相同无量纲时间内方腔的平均温度变化可以分析不同填充方式的能量吸收效率。由于自然对流作用,上下部 NEPCM 融化过程都会出现“上快下慢”的情况,对于分层之后的模型,高温液相流体分别在上、下部顶端聚集,而方腔下部顶端高温流体的热量被上部底端的固相 NEPCM 以潜热的形式吸收,因此整体的平均温度降低,融化效率提高。图 16 所示为不同情形下方腔整体的平均温度曲线,横坐标以无量纲时间 t^* 表示,将其定义为融化时刻与对应状态下完全融化所需时间的比值。在 Gnp 体积分数为 3% 的整体模型中,温度曲线斜率在 $t^*=0.4\sim 0.6$ 阶段逐渐增大。这是由于当固液交界面融化超过方腔对角线的位置后,顶端的液态 NEPCM 在自然对流的情况下吸收显热,温度明显提高。方案(b)温度发生转折

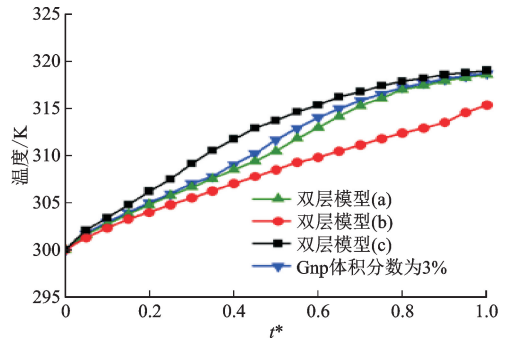


图 16 单隔板模型平均温度变化图

Fig. 16 Changing diagram of the mean temperature of the single-partition model

的时间晚于其他几种模型,这是由于在方案(b)中上下两部分 NEPCM 融化速度更接近,同时在整个融化过程中,方案(b)对应的温度始终低于其他模型,这意味着更多的能量以潜热的形式吸收,因此其蓄热效率也更高。当 $t^* = 0.6$ 时,方案(a)、(b)、(c)和未加隔板体积分数为 3% 的模型平均温度分别为 312.93、309.81、315.35 和 314.01 K,方案(b)所对应的模型平均温度最低。

图 17 所示为不同情况下壁面热通量随无量纲时间的变化。整体来看热通量随时间的变化经历了 3 个阶段。初始阶段热传导起主要作用,液态 NEPCM 出现逐渐变厚的薄层,导热热阻逐渐增大,热通量快速下降;紧接着自然对流作用逐渐加强,在自然对流和液相 NEPCM 热阻的共同作用下热通量基本保持不变;之后随着自然对流强度的降低以及液相 NEPCM 热阻的增大,热通量逐渐降低。对比 3 种不同的填充方案,可以发现它们在第二阶段持续的时间有所不同,方案(b)在 $t^* = 0.7$ 时刻发生转折,而方案(c)在 $t^* = 0.25$ 时刻发生转折,且短于无隔板模型所持续的时间。这是由于对于方案(c)来说,上部填充的是 Gnp 体积分数为 5% 的 NEPCM,并且上部还受到下部 Gnp 体积分数为 1% 的 NEPCM 的加热作用,因此上部融化速度较快,第二阶段所持续的时间也较短,而方案(b)上下两部分融化速度更为接近,因此蓄热效果更好。

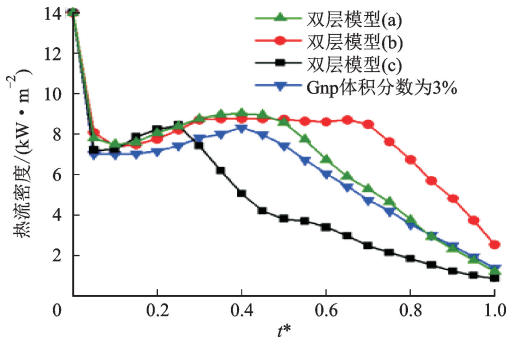


图 17 单隔板模型加热面热通量曲线图
Fig. 17 Heat flux curve of the single-partition model

2.2.4 双隔板对融化效果的影响

将体积分数较高的 NEPCM 填充到矩形分层方腔的下端时,可以促进其上方 NEPCM 的融化,从而增强矩形方腔整体的蓄热效果。在矩形方腔中加入双隔板,根据 NEPCM 的体积分数将矩形方腔自上而下分为 3 层,得到以下 3 种填充方案:(a)上中下 3 层体积比为 1:2:1 且分别填充 Gnp 体积分

数为 5%、1% 和 5% 的 NEPCM;(b)上中下 3 层体积比为 1:1:2 且分别填充 Gnp 体积分数为 1%、1% 和 5% 的 NEPCM;(c)上中下 3 层体积比为 1:1:1 且分别填充 Gnp 体积分数为 1%、3% 和 5% 的 NEPCM。

图 18 所示为 3 层方腔模型中 3 种填充方案与双层模型中填充方案(b)以及 Gnp 体积分数为 3% 未分层的基础模型的液相率随时间变化示意图,其中粉色曲线代表双层模型中融化效果较好的方案(b),红色曲线代表 3 层模型中的方案(a),发现对于 3 层方腔模型而言,若填充方案不合理,则可能会导致融化速度比双层方腔模型慢。将 3 层模型(b)、(c)与双层模型(b)对比可以发现,3 层模型中,模型(c)融化效果最佳,完全融化所需的时间为 861 s,相比于双层模型(b)融化时间 890 s 缩短了 3.3%,相比于整体填充 Gnp 体积分数为 3% 未分层的基础模型融化时间 1 200 s 缩短了 28.25%。经过双层隔板的划分可以进一步加快融化速度,但融化速度的提升效果有限。

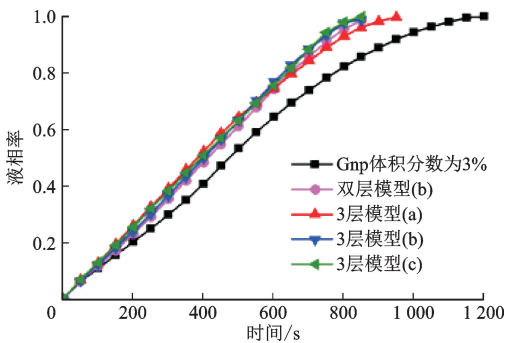


图 18 双隔板模型液相率曲线图
Fig. 18 Liquid phase rate curve of the double-partition model

根据图 19 所示的方腔整体平均温度变化曲线可以发现,相比于 Gnp 体积分数为 3% 的 NEPCM

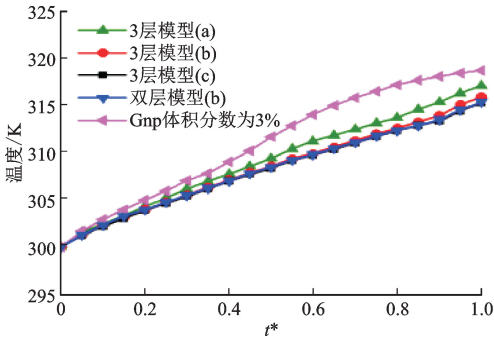


图 19 双隔板模型平均温度曲线变化图
Fig. 19 Plot of the mean temperature of the two-partition model

的整体模型,分层模型中方腔整体温度都有不同程度的降低。这代表从右边界输入的热量相比于未分层方案更多被 NEPCM 以潜热的方式吸收,因此蓄热过程效率也相应提高。与液相率曲线相似的是,3 层模型(b)、(c)和双层模型(b)3 条曲线基本重合,3 层模型(a)的平均温度曲线在 t^* 为 0.5 到 0.9 之间时高于它们 3 种情况。这也说明方案(a)在 t^* 处于 0.5 到 0.9 之间时显热吸热量较多,融化效果较差。

图 20 所示为 3 层方腔模型融化到不同阶段时的温度云图。当融化到 10 min 时,模型(c)3 层融化效果几乎相同,顶部 Gnp 体积分数为 1% 的 NEPCM 在其下方高温流体的加热作用下,融化速度与下方的 NEPCM 几乎相同;模型(a)由于上部填充的是 Gnp 体积分数为 5% 的 NEPCM,因此上部最先完成融化,后期 15 min 时上部的温度也明显高于其他两个模型,而模型(b)与模型(c)融化效果很接近。根据 3 层方腔模型填充方式,发现将体积分数较高的复合纳米材料填充在下层更有利于整体的融化。这是由于上部 NEPCM 可以受到其下方 NEPCM 的加热作用,将体积分数较小的 NEPCM 填充到上方可以使方腔各部分融化更加趋于“一致化”。

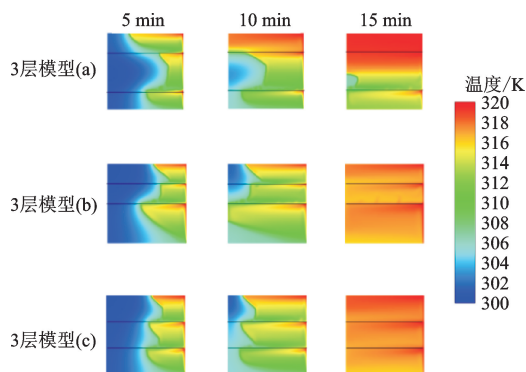


图 20 双隔板模型融化过程温度云图

Fig. 20 Cloud diagram of the temperature in the melting process of the double-partition model

3 结 论

本文在矩形方腔蓄热模型的基础上构建了双层及 3 层方腔分层优化模型,并采用不同的 NEPCM 填充方案,主要结论如下。

(1)当隔板处于方腔中部时融化速度最快,在此基础上将方腔上下部分别填充 Gnp 体积分数为 1% 与 5% 的复合相变材料时融化效果最佳,相比于未加隔板时 Gnp 体积分数为 3% 的复合相变模型融化

时间缩短了 25.83%。实现了在不增加纳米材料用量的前提下,通过模型优化提高蓄热速率。

(2)在双层隔板方腔模型的基础上考虑 3 层方腔隔板模型。当上中下 3 层以 1:1:1 的体积比分层且以 Gnp 体积分数为 1%、3%、5% NEPCM 填充时融化效率较高,相对于整体填充 Gnp 体积分数为 3% NEPCM 的基础模型融化时间缩短了 28.25%。

(3)增加方腔层数可使融化速度增加,但是其增加的幅度逐渐降低。

参考文献:

- [1] MAHDI J M, NSOFOR E C. Melting enhancement in triplex-tube latent heat energy storage system using nanoparticles-metal foam combination [J]. *Applied Energy*, 2017, 191: 22-34.
- [2] KHAN Z, KHAN Z, GHAFOR A. A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 115: 132-158.
- [3] MIRÓ L, GASIA J, CABEZA L F. Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: a review [J]. *Applied Energy*, 2016, 179: 284-301.
- [4] MAZMAN M, CABEZA L F, MEHLING H, et al. Heat transfer enhancement of fatty acids when used as PCMs in thermal energy storage [J]. *International Journal of Energy Research*, 2008, 32(2): 135-143.
- [5] 孙向听, 张华, 王子龙, 等. 填充金属泡沫铜对相变材料在半圆柱容腔中传热机理的研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(2): 21-30.
SUN Xiangxin, ZHANG Hua, WANG Zilong, et al. Study on heat transfer mechanism of phase change materials filled with copper foam in a semi-cylindrical cavity [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(2): 21-30.
- [6] 朱孟帅, 闫勤学, 王子龙, 等. 铜金属泡沫填充率对相变材料融化过程强化传热的机理研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(13): 4915-4923.
ZHU Mengshuai, YAN Qinxue, WANG Zilong, et al. Effect of the copper metal foam proportion on heat transfer enhancement in the melting process of phase change materials [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(13): 4915-4923.
- [7] METTAWEE E B S, ASSASSA G M R. Thermal conductivity enhancement in a latent heat storage system [J]. *Solar Energy*, 2007, 81(7): 839-845.
- [8] ALTOHAMY A A, ABD RABBO M F, SAKR R Y,

- et al. Effect of water based Al_2O_3 nanoparticle PCM on cool storage performance [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 84: 331-338.
- [9] BALANDIN A A, GHOSH S, BAO Wenzhong, et al. Superior thermal conductivity of single-layer graphene [J]. *Nano Letters*, 2008, 8(3): 902-907.
- [10] 侯玉洁. 碳纳米管强化石蜡相变材料传热特性研究 [D]. 天津: 天津商业大学, 2022.
- [11] 田东东, 王会, 刁永发, 等. 金属泡沫孔密度对石蜡融化性能影响的实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(5): 32-39.
- TIAN Dongdong, WANG Hui, DIAO Yongfa, et al. Experimental investigation on the melting behavior of paraffin wax embedded in metal foams with different pore densities [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(5): 32-39.
- [12] 件凡, 王子龙, 张华, 等. 球状相变蓄热材料在水箱中的分层特性数值分析与实验 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(22): 7702-7711, 中插 15.
- WU Fan, WANG ZI Long, ZHANG Hua, et al. Analysis of the thermal stratification property in hot water tank with globular PCMs: CFD and experiment study [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(22): 7702-7711, 中插 15.
- [13] SATHISHKUMAR A, KUMARESAN V, VELRAJ R. Solidification characteristics of water based graphene nanofluid PCM in a spherical capsule for cool thermal energy storage applications [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 66: 73-83.
- [14] LI Xing, CHEN Ying, CHENG Zhengdong, et al. Ultrahigh specific surface area of graphene for eliminating subcooling of water [J]. *Applied Energy*, 2014, 130: 824-829.
- [15] 吴淑英. 纳米复合蓄热材料强化相变传热实验与数值模拟研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [16] 陈岩, 叶宇轩, 杜文静. 泡沫金属在熔盐相变蓄热中的强化传热特性 [J]. *化工进展*, 2020, 39(7): 2566-2573.
- CHEN Yan, YE Yuxuan, DU Wenjing. Heat transfer enhancement performance in phase change process of molten salt using foam metal [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(7): 2566-2573.
- [17] HARISH S, OREJON D, TAKATA Y, et al. Thermal conductivity enhancement of lauric acid phase change nanocomposite with graphene nanoplatelets [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 80: 205-211.
- [18] LI Tingxian, LEE J H, WANG Ruzhu, et al. Heat transfer characteristics of phase change nanocomposite materials for thermal energy storage application [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 75: 1-11.
- [19] LI Tingxian, LEE J H, WANG Ruzhu, et al. Enhancement of heat transfer for thermal energy storage application using stearic acid nanocomposite with multi-walled carbon nanotubes [J]. *Energy*, 2013, 55: 752-761.
- [20] DAS N, TAKATA Y, KOHNO M, et al. Melting of graphene based phase change nanocomposites in vertical latent heat thermal energy storage unit [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 107: 101-113.
- [21] KHODADADI J M, FAN Liwu, BABAEI H. Thermal conductivity enhancement of nanostructure-based colloidal suspensions utilized as phase change materials for thermal energy storage: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 24: 418-444.
- [22] DAS N, KOHNO M, TAKATA Y, et al. Enhanced melting behavior of carbon based phase change nanocomposites in horizontally oriented latent heat thermal energy storage system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 125: 880-890.
- [23] KAMKARI B, SHOKOUHMAND H, BRUNO F. Experimental investigation of the effect of inclination angle on convection-driven melting of phase change material in a rectangular enclosure [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 72: 186-200.

(编辑 荆树蓉 亢列梅)