

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

孙向昕^{1,2}, 张华^{1,2}, 王子龙^{1,2}, 豆斌林^{1,2}, 张冠华^{1,2}

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 200093, 上海;

2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 200093, 上海)

摘要: 为研究不同金属泡沫铜填充率下金属泡沫铜对石蜡融化过程的传热规律, 设计并搭建了一套可视化蓄能实验装置, 并建立了对应的数学传热模型, 分析了不同填充率下复合相变材料在融化过程中温度分布、固液相界面、速度矢量、液相分数和平均 Nu 的变化, 得到了不同填充率下金属泡沫铜对石蜡相变过程的强化传热机理, 并进行了实验验证。结果表明: 当金属泡沫铜的填充率从 0 增大至 1.28% 时, 复合相变蓄热材料的融化时间从 901 s 缩短至 830 s, 较纯石蜡减少了 7.88%, 而当泡沫铜填充率为 1.28% 时, 石蜡内部温度为 12.6 K, 梯度最小; 平均 Nu 从 24.89 下降到 3.27, 下降了 86.9%。由模拟结果可得, 填充率为 0.43%、1.28% 的复合相变材料液化速率较纯石蜡分别提高了 1.61%、7.11%, 这说明金属泡沫铜的填充率越大, 强化传热效果越好。

关键词: 石蜡; 泡沫金属; 自然对流; 强化传热; 数值模拟

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202302003 **文章编号:** 0253-987X(2023)02-0021-10

Study on Heat Transfer Mechanism of Phase Change Materials Filled with Copper Foam in a Semi-Cylindrical Cavity

SUN Xiangxin^{1,2}, ZHANG Hua^{1,2}, WANG Zilong^{1,2}, DOU Binlin^{1,2}, ZHANG Guanhua^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Sciences and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to explore the influence of copper foam filling on internal heat transfer during paraffin melting, a set of visual energy storage experimental device is designed and built, and its mathematical heat transfer model is established accordingly. The changes in temperature distribution, solid-liquid interface, velocity vector, liquid fraction and mean Nusselt number of composite phase change materials with different filling rates during melting are analyzed, and the mechanism of enhanced heat transfer of paraffin wax by copper foam filling rate is concluded. The results show that when the copper foam filling rate increases from 0% to 1.28%, the melting time of composite PCM decreases from 901 s to 830 s, showing a reduction of 7.88% than that of pure paraffin wax. At the copper foam filling rate of 1.28%, paraffin wax gains the smallest temperature gradient of 9.1 K. According to the simulation results, the liquefaction rates of the compos-

收稿日期: 2022-06-14。 作者简介: 孙向昕(1998—), 男, 硕士生; 王子龙(通信作者), 男, 副教授, 硕士生导师。 基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(20ZR1438600); 上海市教委青年东方学者项目(1018301008); 上海市浦江人才计划项目(18PJ1408900)。

网络出版时间: 2022-11-03

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20221103.0858.002.html>

ite phase change materials with filling rates of 0.43% and 1.28% are 1.61% and 7.11% higher than those of pure paraffin, respectively. This indicates that higher copper foam filling rate leads to better enhanced heat transfer effect.

Keywords: paraffin; mental foam; natural convection; heat transfer enhancement; numerical simulation

减少碳排放以应对气候变化已成为全球共识,为响应实现“双碳”目标的号召,大力推动可再生能源高效利用成为重中之重。太阳能作为可再生能源中最具有前景的一种能源,但其供应和需求之间存在着时间和地理上的不匹配,限制了太阳能广泛应用^[1]。相变材料由于相变潜热高、在较小的温度变化范围内获得较大的能量以及易储存的特点,可以提高太阳能利用效率,但相变材料导热系数低,导致储能效率低,限制了其在储能材料领域的应用^[2-3]。为解决这个问题,通常利用翅片^[4]、热管^[5]强化相变材料传热,或者通过加入金属泡沫^[6-9]、纳米颗粒^[10-11]、膨胀石墨^[12-14]和相变材料封装^[15-16]等方法提高相变材料导热率。其中金属泡沫具备重量轻、比表面积大、高孔隙率和高导热率等优点,能有效改善相变材料的传热性能。

国内外学者就金属泡沫对相变材料的影响进行了大量研究。Xiao等采用真空浸渍法制备了金属泡沫铜/石蜡复合相变材料和金属泡沫镍/石蜡复合相变材料,通过实验测得其有效导热系数,实验结果表明孔隙率为96.95%、孔密度为25PPI的铜复合相变材料有效导热系数是纯石蜡的13倍,孔隙率为97.45%、孔密度为25PPI的镍复合相变材料的有效导热系数是纯石蜡的3倍,铜、镍金属泡沫均能提高相变材料的有效导热系数^[6]。田东东等设计实验研究了不同孔密度的镍泡沫和铜泡沫对石蜡融化性能的影响,实验结果表明随着孔密度增大,镍复合相变材料内部温度堆积现象加重,铜复合相变材料较镍复合相变材料的响应时间均有缩短,最大缩短幅度为38%^[17]。Liu等设计了4种不同的金属泡沫填充结构,采用粒子图像测速技术和红外热像技术研究了相变材料在一个方形空腔内部分填充金属泡沫时的瞬态相变性能,实验结果表明:下多孔填充能够有效加速固体区域融化,综合考虑总熔化时间和局部 Nu ,下孔填充可作为具有较高热工性能的最佳多孔填充策略^[18]。Xu等研究了多孔材料对含有相变材料的同心管内的传热的影响,对铜、碳化硅、镍和氧化铝进行比较,结果表明铜复合相变材料的热能储存率最大,是热能储存率最下的氧化铝的4

倍^[19]。Tao等采用晶格格玻尔兹曼方法研究了复合相变材料的相变潜热性能,结果表明,当金属泡沫孔隙率较小时,提高孔密度可以提高相变材料潜热储存,当孔隙率较大时,降低孔密度可以提高潜热储存^[20]。Zhang等建立了三维多孔介质来研究不同孔隙率梯度的金属泡沫对相变材料融化过程的影响,结果表明:随着孔隙率的增大,储热密度增大,且金属泡沫孔隙率从上往下成线性变化时(85.9%~95.8%),可以通过强化底部区域角落的传热过程,提高储热速率^[21]。Tiari等采用数值模拟的方法分析不同孔隙率的泡沫铜对储热单元融化和凝固过程的影响,模拟结果表明在三根热管的辅助下,孔隙率为0.972、0.909 1的铜复合相变材料融化时间较纯相变材料分别缩短43.7%、69.2%,凝固时间较纯相变材料分别缩短73.3%、86.7%,较小的孔隙率对相变材料融化、凝固时间的影响显著^[22]。Meng等通过数值模拟研究了在矩形外壳内填充不同比例的金属泡沫对相变材料传热性能的影响,结果表明,泡沫金属体积分数越高,相变材料热性能改善越大,金属泡沫最佳体积分数为5%^[23]。Joshi等对不同填充高度比和金属泡沫孔隙率的融化性能进行数值研究,结果表明,随着填充高度比减小,总融化时间增加,固定填充高度比下,孔隙率越小,总融化时间越短^[24]。

综上所述,目前国内外学者对于金属泡沫强化相变材料蓄热机理的研究主要集中在孔隙率和孔密度方面。考虑到金属泡沫会减少相变材料填充质量,一些学者开始研究金属泡沫填充率对相变材料融化性能的影响,其中主要为数值模拟研究,但缺乏金属泡沫填充率对石蜡相变蓄热过程强化传热的实验研究。因此,本文搭建了石蜡融化传热机理实验平台,并建立了其传热数学模型,分析了铜金属泡沫填充率对相变材料融化过程中温度分布、固液相界面、速度矢量、液相分数和平均 Nu 的影响,研究结果可为改善相变材料的传热性能提供依据和参考。

1 实验研究

1.1 实验样品

采用真空浸渍法制备不同填充率的泡沫金属复

合相变材料,填充率为金属泡沫与蓄热容腔体积之比,本文制备了3种填充率的金属泡沫复合相变材料,分比为0%、0.43%和1.28%,所用材料为金属泡沫铜和石蜡 RT75。金属泡沫铜的孔隙率为95%、孔径为5PPI,经机械加工制成半径为23 mm的半圆。相变材料采用切片石蜡 RT75,相变温度为348~365 K。复合相变材料制备前后对比图如图1所示。为获取本文所采用石蜡的相变性能,利用差示扫描量热仪(DSC_200F3)测量石蜡基础热物理性能,如表1所示。



金属泡沫 石蜡 复合相变材料

图1 复合相变材料制备前后对比图

Fig. 1 Comparison of composite phase change materials before and after preparation

表1 石蜡和铜的热物性

Table 1 Thermal properties of paraffin wax and copper

参数	石蜡	铜
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	837	8 920
导热率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.305	401
固态比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1 750	380
液态比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	2 540	
相变温度/K	348~365	
相变潜热/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	218 400	

1.2 实验装置

为研究金属泡沫填充率对石蜡融化传热过程的影响,搭建了一套可视化实验系统,实验系统由加热装置、蓄热装置和数据采集装置组成,如图2所示。加热装置由直流电源和硅橡胶加热板组成,加热板布置在腔体左侧和底部,两片加热板的尺寸为90 mm×80 mm×1 mm、R25 mm×1 mm,蓄热装置由铝制半圆柱腔体、保温材料和有机玻璃组成,数据采集装置由测温装置铂电阻、Agilent 数据采集仪、计算机和高清相机组成,其中铂电阻的测量误差为±0.1℃,数据采集时间间隔为1 s。

铂电阻的位置布置如图3所示。本文共布置4个铂电阻,分别为T1~T4,均位于腔体中心,距底面高度为10、30、50和60 mm。为保证实验过程中初始条件相同,将环境温度设置为25℃,加热功率

设置为72 W,每30 s拍摄一次石蜡融化过程中固液界面的变化。

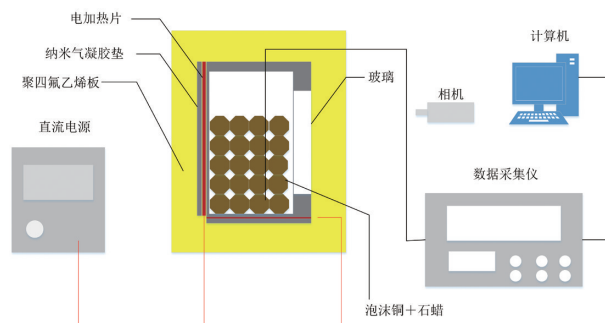


图2 实验装置系统图

Fig. 2 System diagram of experimental setup

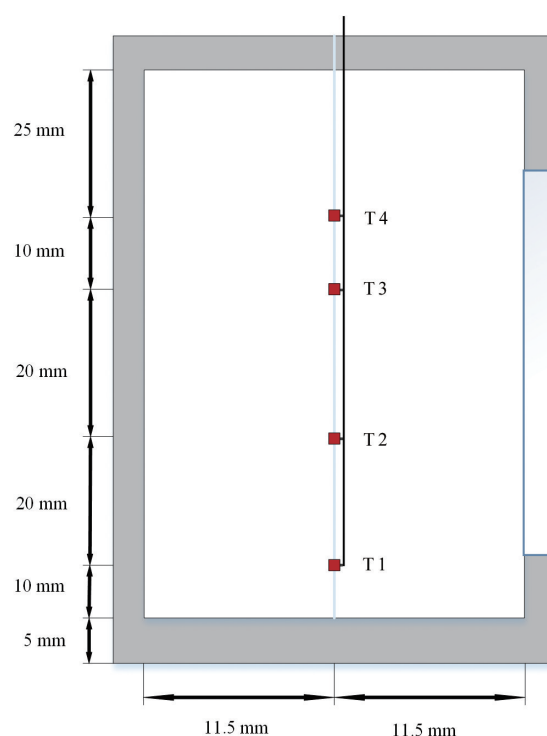


图3 铂电阻位置布置图

Fig. 3 Platinum resistance position layout

2 数理模型的建立与验证

2.1 物理模型

由于其几何形状和物理对称型,在建立物理模型的时候,将实际半圆柱蓄热容腔简化为四分之一圆柱蓄热容腔,这样可减少网格数量,大大提高计算效率。通过文献[22]的方法对铜金属泡沫进行三维建模,来构造不同填充率下的物理模型,如图4所示。

在开展利用物理模型进行数值计算之前,本文

对该模型做出如下假设:①将液态石蜡视为不可压缩牛顿流体,并对其密度进行 Boussinesq 假设;②假设泡沫铜均质各向同性,液态石蜡在泡沫铜中的流动为层流,忽略相变过程中石蜡的体积膨胀;③在模拟过程中,不考虑石蜡融化重力下沉产生的扰动,故模拟过程为固定融化。

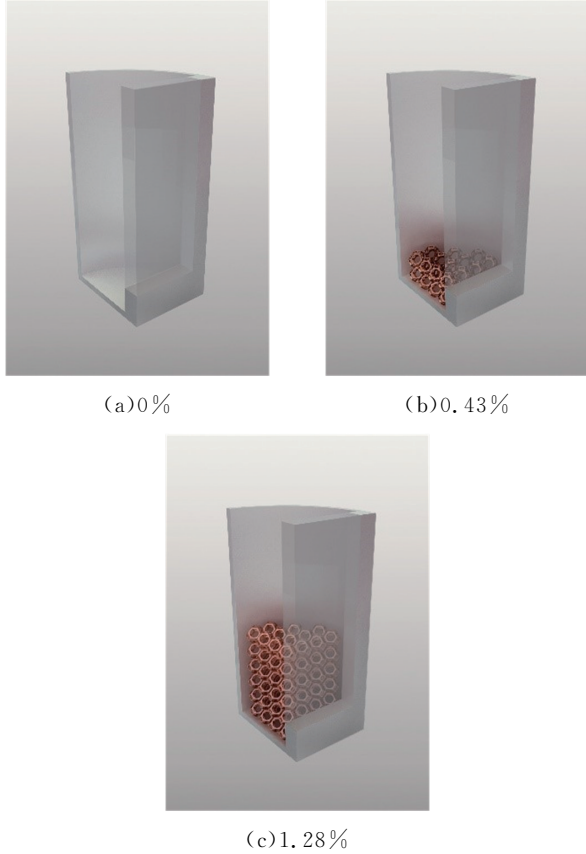


图 4 不同填充率下的物理模型

Fig. 4 Physical models at different filling rates

2.2 数学模型

基于上述假设,可得蓄热容腔内相变材料和金属泡沫的能量方程^[25-26]。

相变材料

$$\rho_f c_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f c_{pf} u \nabla T_f = \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) - \rho_f r \frac{\partial f_1}{\partial t} \quad (1)$$

金属泡沫

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) \quad (2)$$

$$f_1 = \begin{cases} 0, & T \leq T_s & \text{固相} \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, & T_s < T < T_l & \text{糊状区} \\ 1, & T \geq T_l & \text{液相} \end{cases} \quad (3)$$

$$T_s = T_f, \quad k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = k_f \frac{\partial T_f}{\partial n} \quad (4)$$

式中:下标 f、s 分别表示相变材料和铜金属泡沫; ρ 为密度; c_p 为比热容; T 为温度; t 为时间; k 为导热系数; r 为相变潜热; f_1 为相变材料液相分数; T_s 为相变材料和金属韧带界面处的共轭传热。数值模型中侧部和底部加热面采用恒热流边界条件,顶部及玻璃侧为自然对流边界,其余边界绝热。此外,在金属泡沫边缘处的界面属于蓄热容腔内部面,需要将金属泡沫与蓄热容腔内部接触面均设置为 interface 面,并在 Fluent 中 Mesh Interfaces 选项下将其合并成共轭面,以实现相变材料和铜金属泡沫共轭传热。

初始条件为

$$T(x, y, z)|_{t=0} = T_{in} \quad (5)$$

边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q \quad (6)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = k(T - T_{in}) \quad (7)$$

式中: q 为热流密度; n 为空间坐标; k 为顶部及玻璃侧的自然对流换热系数; T_{in} 取值 295 K。

2.3 模型验证

为验证本文数值模型的准确性,选取铜泡沫金属填充率为 0.43% 时复合相变材料融化过程中温度随时间变化的实验值和模拟值进行对比,结果对比如图 5 所示,最大误差仅为 1.38%,该数值模型能较好预测实验中复合相变材料的融化过程。

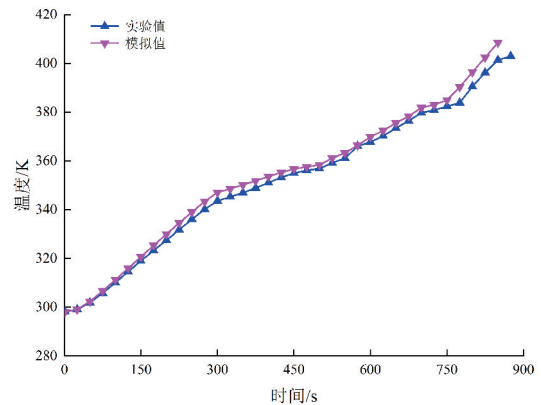


图 5 模型验证

Fig. 5 validation of model

3 结果与讨论

3.1 温度场的变化

复合相变材料在融化过程中金属泡沫填充率对温度分布的影响如图 6 所示。在图 6(a) 中,铂电阻

测温达到 348 K 的顺序是 T1、T4、T3 和 T2,分别为 567、603、689 和 690 s,与 T4 相比,T1 的初始融化时间缩短了 5.97%,且 T1 的温升速率较大,这是因为 T1 靠近底部热源的缘故。T4 处于容腔顶部,但 T4 到达融化时间比 T2、T3 快,说明纯石蜡在融化过程中的传热方式除了热传导还存在自然对流,即 T3、T4 之间的纯石蜡融化过程的传热形式为自然对流。当各铂电阻温度达到 365 K 时,纯石蜡融化过程中的传热以自然对流为主。铜金属泡沫可以提高复合相变材料的导热性能,铜金属泡沫的填充率越大,热传导增强越明显。在图 6(b)中,当铜金属泡沫的填充率为 0.43% 时,达到 348 K 的铂电阻顺序为 T1、T4、T3 和 T2,分别为 433、627、683 和 705 s。与纯石蜡相比,T1 的初始融化时间减少了 23.63%,T4 的初始融化时间增加了 3.98%,说明铜金属泡沫可以提高复合相变材料的导热系数,但是纯石蜡区域的自然对流有所减弱。当铜金属泡沫的填充率为 1.28% 时,达到 348 K 的铂电阻顺序为 T1、T2、T4、T3,分别为 327、429、596 和 643 s。与纯石蜡相比,T2 到达相变温度要比 T4 快,到达初始融化时间缩短了 28%,表明铜泡沫金属的高导热性使得底部复合相变材料导热强度高于容腔顶部纯石蜡区自然对流强度。因此,铜金属泡沫增强了纯石蜡在融化过程中的热传导,铜金属泡沫的填充率越大,融化过程中热传导强度增加越明显。此外,石蜡中的温度梯度随着铜金属泡沫填充率的增加而减小。当加热时间为 780 s 时,铜金属泡沫的填充率从 0% 增大到 1.28% 时,温度梯度从 86.1 K 下降到 29.2 K,表明导热系数的增加大于自然对流换热系数的减少,且温度分布更加均匀。

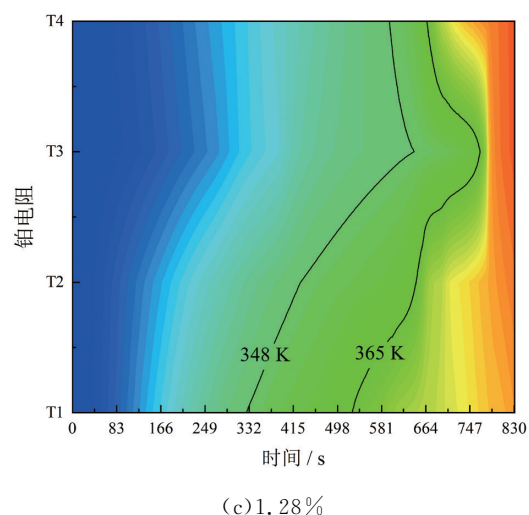
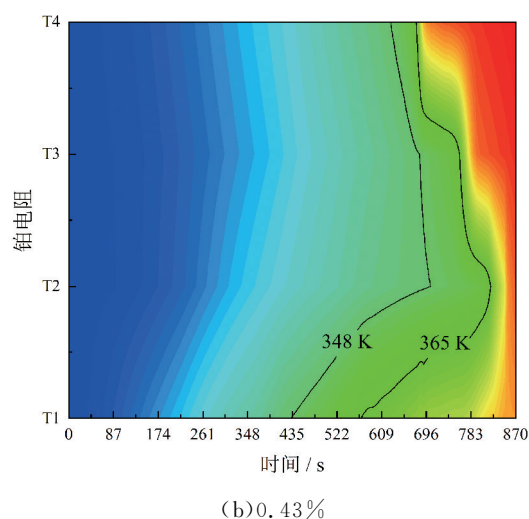
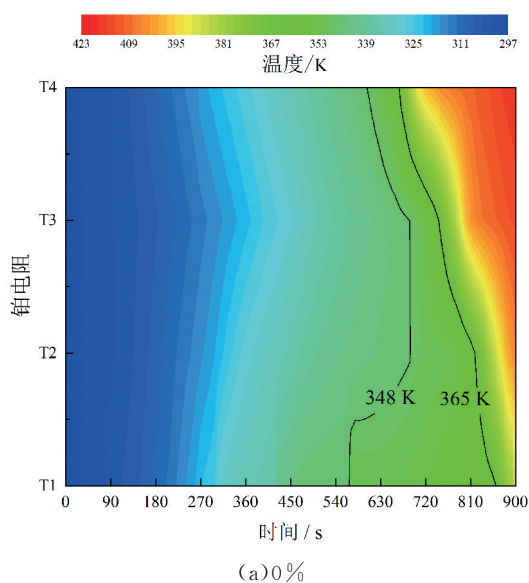


图6 铜金属泡沫填充率对石蜡温度分布的影响

Fig. 6 Effect of filling rate of copper foam on temperature distribution of paraffin wax

3.2 填充率对石蜡融化过程中固液界面的影响

泡沫金属耦合石蜡相变材料在融化过程中固-液界面的变化如图 7 所示,图 7 中数值计算下的云图分别表示为蓄热装置中对称面的固-液界面,云图中蓝色部分为固态石蜡,红色部分为液态石蜡,其余颜色为糊状区熔融状态下的石蜡;可视化实验条件下固-液界面白色和黑色分别代表固态、液态石蜡,中间灰色部分表示熔融状态下的石蜡。由图 7 可知,当加热时间为 480 s 时,不同填充率下泡沫金属耦合石蜡相变材料的固-液界面曲线未发现明显弯曲,说明热量是垂直于加热面传递到相变材料中,导热是此时石蜡融化的主要传热机制,当加热时间为 600~780 s 之间时,填充率为 0.43%、1.28% 的泡沫金属耦合石蜡相变材料的固-液界面曲线明显弯曲,说明自然对流开始参与石蜡的融化,并且随着

加热时间的增加,石蜡融化的传热机制逐渐由导热向自然对流过渡。由图7可知,底部熔融状态的石蜡厚度随着泡沫铜填充率的增加而增加,糊状区熔融状态下的石蜡厚度越大,对石蜡融化过程中自然对流抑制越强烈。当融化时间为780 s时,填充率为1.28%的泡沫金属铜耦合石蜡相变材料即将融化完毕,而填充率为0%的泡沫金属耦合石蜡相变材料所剩余的固态石蜡最多,表明泡

沫铜的填充虽然强化了复合相变材料的导热强度,但同时也削弱了石蜡在融化过程中的自然对流,且泡沫铜对石蜡导热能力的强化效果大于对自然对流的抑制。因此,泡沫金属铜耦合石蜡相变材料在融化过程中的综合传热系数随着泡沫铜填充率的增加而增大。根据固-液界面的模拟结果与可视化实验照片的对比,说明数值计算能够较好地吻合实验结果。

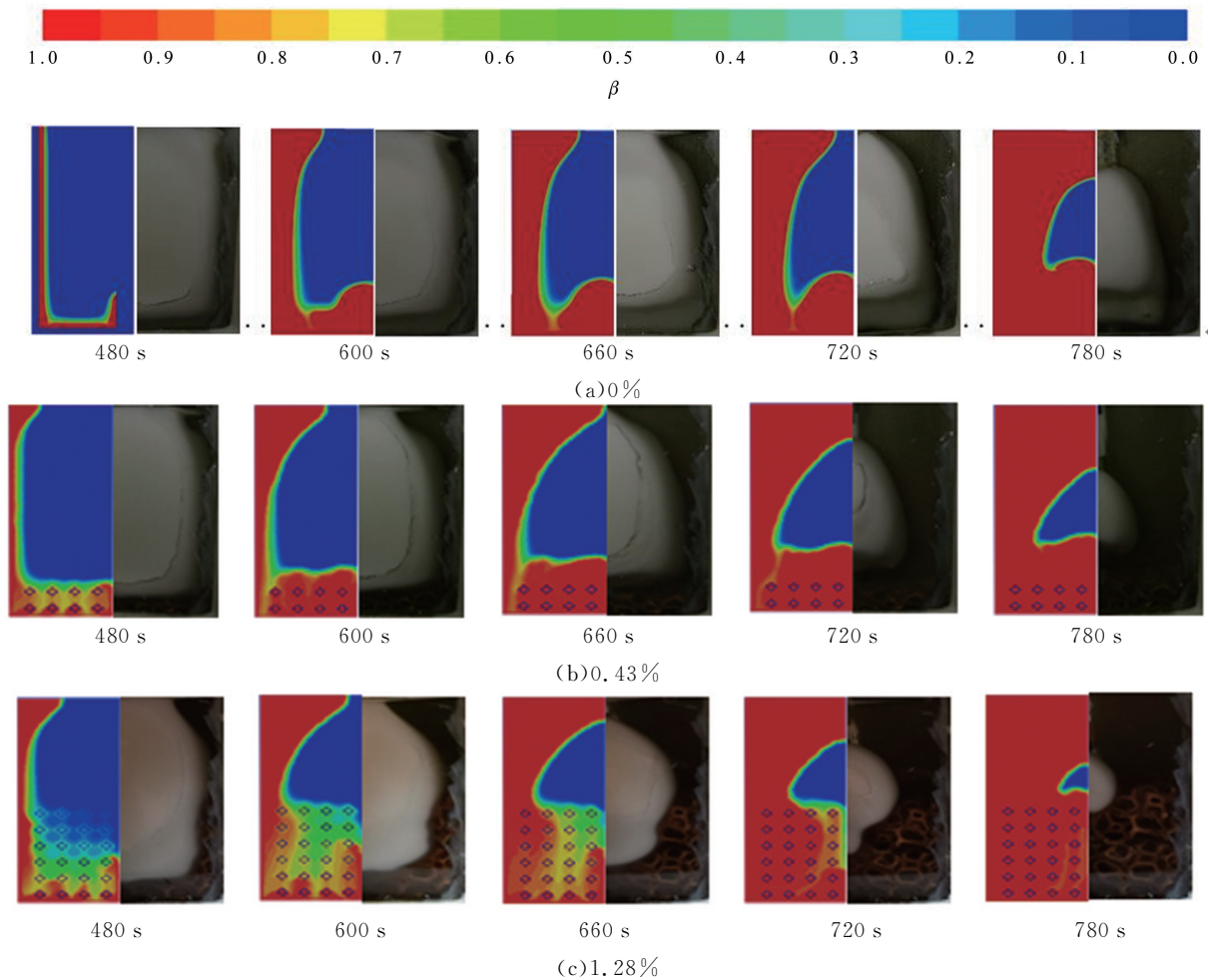


图7 填充率对复合相变材料固液界面的影响

Fig. 7 Effect of filling rate on solid-liquid interface of composite phase change materials

3.3 速度矢量

图8所示为480、660、720和780 s时,不同填充率下铜金属泡沫耦合石蜡相变材料融化过程的速度矢量。由模拟结果可知,加热前期,蓄热装置内靠近热源壁面处的石蜡率先融化,热源壁面附近液相石蜡因热浮升力的原因向上流动,固-液界面附近的石蜡因重力作用导致向下流动,在密度差的驱动下形成自然对流,而后随着加热时间的增加,石蜡逐渐

融化,自然对流效应得到强化,对流换热区域扩大,从而推动固-液界面不断向远离热源壁面的方向移动。由速度矢量可知,不同泡沫铜填充率下的顶部石蜡的流动速度随着加热时间的增加而加快,当铜金属泡沫填充率为0%、0.43%和1.28%时,顶部石蜡的流动速度分别为 6.3×10^{-4} 、 2.49×10^{-3} 和 3.14×10^{-3} m/s,这是因为由于自然对流的产生及对流换热区域的扩大,加速了顶部液相石蜡的流动

速度。填充有铜金属泡沫的石蜡在融化过程中流动速度较纯石蜡快,这是因为铜的高导热性使得铜金属泡沫内石蜡融化温度较纯石蜡高,与顶部液相石蜡的温差增大,导致填充有铜金属泡沫的石蜡在融化过程中流动速度变大。但随着铜金属泡沫填充率提高,复合相变材料内部最大流动速度减小,泡沫铜填充率为0.43%、1.28%时,最大流动速度为 9.12×10^{-3} 、 7.84×10^{-3} m/s,表明随着铜金属泡沫填充率增加,对复合相变材料内部自然对流存在一定抑制作用。

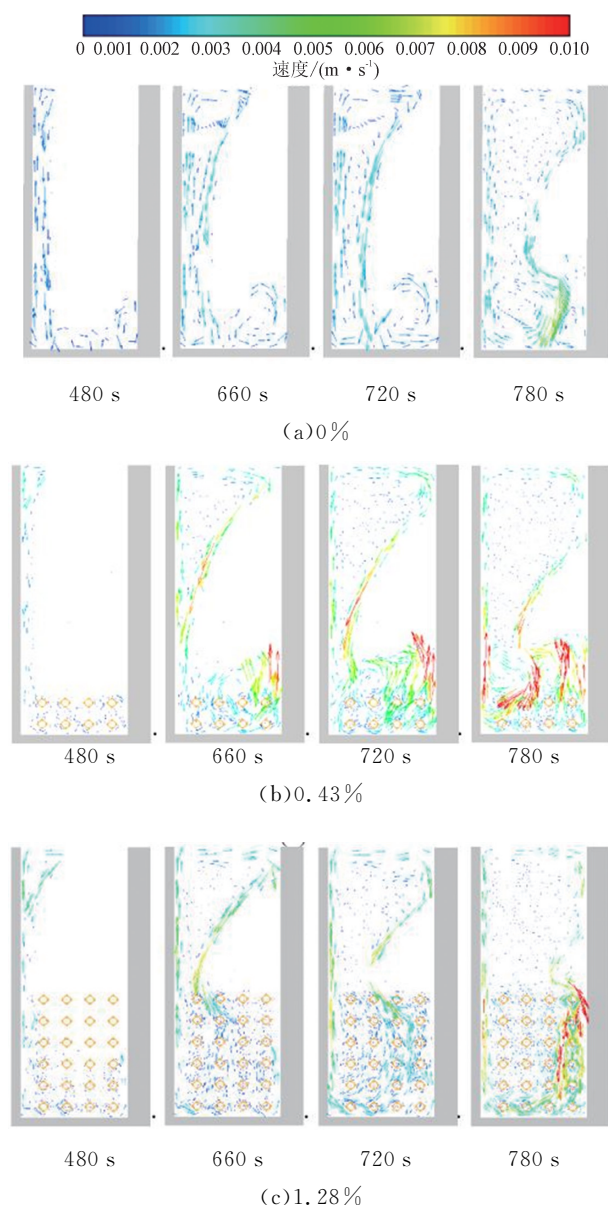


图8 填充率对复合相变材料速度场的影响

Fig. 8 Effect of filling rate on velocity field of composite phase change materials

3.4 填充率对复合相变材料液相分数的影响

泡沫铜填充率对复合相变材料液相分数的影响

如图9所示。石蜡在融化过程中的液相分数可以表征强化传热程度,达到相同液相分数所需的时间越短,表明复合相变材料的液化速率越大。由图9可知,在融化前期,当泡沫铜填充率为0%、0.43%和1.28%时,开始融化时间分别为248、232和176 s,较纯石蜡融化时间分别缩短了6.5%和29%;融化结束的时间分别为858、810 s,较纯石蜡模型分别减少了1.61%、7.11%。这是因为泡沫金属的加入强化了复合相变材料的导热能力,使内部温度分布更加均匀,进而提高其融化速率。同时,随着泡沫金属填充率的增加,在相同时刻下液相分数逐渐增加。在720 s、泡沫金属填充率为0%时,液相分数为0.6289。当泡沫金属填充率为0.43%、1.28%时,其液相分数分别为0.7117、0.8384,较纯石蜡增加了4.58%、33.31%,表明泡沫金属能够在复合相变材料内部形成有效的导热网络,解决底部热量堆积的问题,进而强化复合相变材料的传热能力。

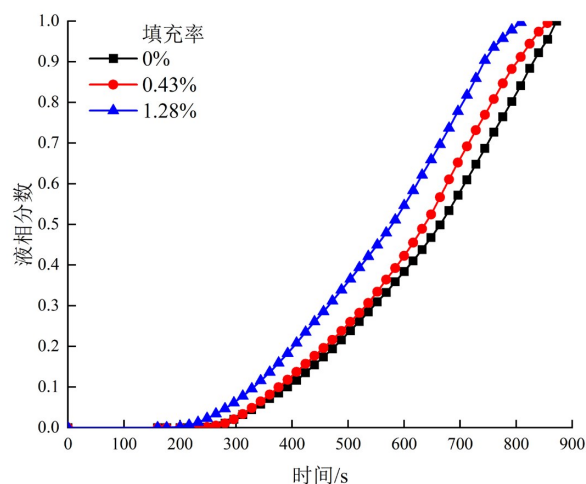


图9 填充率对复合相变材料液相分数的影响

Fig. 9 Effect of filling rate on liquid phase fraction of composite phase change materials

3.5 填充率对平均 Nu 的影响

图10为泡沫铜的填充率对平均 Nu 的影响。平均 Nu 的计算公式为

$$k = \frac{Q}{A_w (T - T_m) t} \quad (8)$$

$$\overline{Nu} = \frac{kL}{\lambda_{pcm}} \quad (9)$$

式中: Q 为加热功率; A_w 为加热面表面积; T 为热源壁面温度; T_m 为相变材料融化温度; t 为相变材料完全融化时间; L 为特征长度,本文指复合相变材料填充高度; λ_{pcm} 为相变材料导热系数。

由图 10 可知,随着泡沫铜填充率的增加,泡沫金属铜耦合石蜡相变材料的平均 Nu 减小。当铜金属泡沫填充率为 0.43% 时,平均 Nu 从 39.99 下降到 5.42,下降了 86.4%;当铜金属泡沫填充率为 1.28% 时,平均 Nu 从 24.89 下降到 3.27,下降了 86.9%,表明泡沫铜的填充减弱了石蜡在融化过程中自然对流,并且泡沫铜的填充率越大,对自然对流抑制的效果越明显。此外,不同填充率下泡沫金属耦合石蜡相变材料融化初期的平均 Nu 较大,这是由于石蜡在加热前期对周围环境的热损失以及热源壁面与纯石蜡之间的温差最小造成的。随着石蜡融化过程的继续进行,平均 Nu 逐渐降低并最终趋于恒定,这主要是因为融化初期,石蜡融化的传热机制以导热为主,此时石蜡的传热系数较低,石蜡内部热阻较大,热源壁面与纯石蜡之间的温差变大,从而导致平均 Nu 降低。而后,当自然对流逐步占据主导传热机制时,石蜡的热系数增大,石蜡内部热阻减小,热源壁面热量能够快速传递至石蜡内部,使得热源壁面与纯石蜡之间的温差趋于恒定,同时由于石蜡在融化过程中熔融状态下糊状区厚度增加,平均 Nu 趋于恒定。

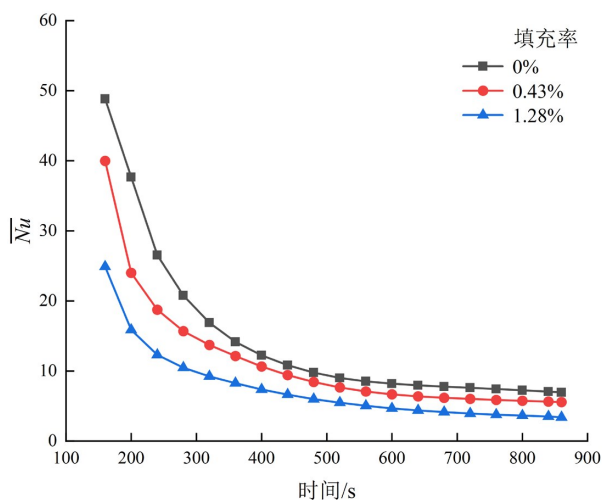


图 10 填充率对平均 Nu 的影响

Fig. 10 Effect of filling rate on average Nusselt number

4 结 论

为探究复合相变蓄热材料中泡沫铜的填充率对石蜡强化换热机理,搭建了实验平台,采用实验与数值模拟相结合的方法,分析了泡沫铜填充率对相变材料融化过程中温度分布、固液相界面、液相分数以及平均 Nu 的影响,可得如下结论。

(1) 泡沫铜能够强化纯石蜡的传热,泡沫铜填充率越大,传热强化越大。泡沫铜的填充能够可以改善纯石蜡的温度均匀性。当泡沫铜填充率从 0% 增加到 1.28% 时,石蜡的融化时间从 901 s 缩短到 830 s,温度梯度从 86.1 K 降至 12.6 K。

(2) 泡沫铜的填充能够有效增强石蜡的热传导,泡沫铜的填充率越大,强化传热效果越好,融化开始时间越早。由模拟结果可得,填充率为 0.43%、1.28% 的复合相变材料液化速率较纯石蜡分别提高了 1.61%、7.11%。

(3) 添加铜金属泡沫后,削弱了相变材料在融化过程中自然对流的,使得平均 Nu 随着填充率增加而减小。当铜金属泡沫填充率为 1.28% 时,平均 Nu 从 24.89 下降到 3.27,下降了 86.9%。

通过对不同填充率下铜金属泡沫耦合石蜡复合相变材料的实验和模拟研究,了解部分填充铜金属泡沫对石蜡融化过程中传热方式的影响,可为今后设计部分填充金属泡沫的蓄热装置提供一定的参考。

参考文献:

- [1] ZHANG Shuai, FENG Daili, SHI Lei, et al. A review of phase change heat transfer in shape-stabilized phase change materials (ss-PCMs) based on porous supports for thermal energy storage [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135: 110127.
- [2] GADHAVE P, PATHAN F, KORE S, et al. Comprehensive review of phase change material based latent heat thermal energy storage system [J]. International Journal of Ambient Energy, 2022, 43(1): 4181-4206.
- [3] TAUSEEF-UR-REHMAN T, ALI H M, JANJUA M M, et al. A critical review on heat transfer augmentation of phase change materials embedded with porous materials/foams [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 649-673.
- [4] 甘玉娟, 彭浩, 王一峰. 微重力下内嵌翅片蓄热腔体内相变材料的融化传热特性 [J]. 热能动力工程, 2020, 35(12): 108-114.
GAN Yujuan, PENG Hao, WANG Yifeng. Melting heat transfer characteristics of phase change material in thermal energy storage cavity with Fins under micro-gravity [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(12): 108-114.
- [5] 张宇迪, 章学来, 纪珺, 等. 基于热管技术的相变材料强化传热技术进展 [J]. 功能材料, 2019, 50(1): 1056-1066.

- ZHANG Yudi, ZHANG Xuelai, JI Jun, et al. Progress in heat transfer enhancement of phase change materials [J]. *Journal of Functional Materials*, 2019, 50(1): 1056-1066.
- [6] XIAO X, ZHANG P, LI M. Preparation and thermal characterization of paraffin/metal foam composite phase change material [J]. *Applied Energy*, 2013, 112: 1357-1366.
- [7] HUANG Xiang, LIN Yaxue, ALVA G, et al. Thermal properties and thermal conductivity enhancement of composite phase change materials using myristyl alcohol/metal foam for solar thermal storage [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 170: 68-76.
- [8] 郭增旭, 白青松, 杨肖虎, 等. 不同倾角下通孔金属泡沫强化蓄热实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(1): 157-162.
- GUO Zengxu, BAI Qingsong, YANG Xiaohu, et al. Experimental investigation on the heat storage enhancement of phase change materials embedded in open-cell metal foam in an inclined rectangular enclosure [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(1): 157-162.
- [9] 白青松, 郭增旭, 刘亦琳, 等. 通孔金属泡沫强化蓄冰实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(1): 20-25.
- BAI Qingsong, GUO Zengxu, LIU Yilin, et al. Experimental study on enhanced ice storage in open-cell metal foams [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(1): 20-25.
- [10] CUI Yanbin, LIU Caihong, HU Shan, et al. The experimental exploration of carbon nanofiber and carbon nanotube additives on thermal behavior of phase change materials [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95(4): 1208-1212.
- [11] TIAN Heqing, DU Lichan, WEI Xiaolan, et al. Enhanced thermal conductivity of ternary carbonate salt phase change material with Mg particles for solar thermal energy storage [J]. *Applied Energy*, 2017, 204: 525-530.
- [12] SARI A, KARAIPEKLI A. Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(8/9): 1271-1277.
- [13] LING Ziyue, CHEN Jiajie, XU Tao, et al. Thermal conductivity of an organic phase change material/expanded graphite composite across the phase change temperature range and a novel thermal conductivity model [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 102: 202-208.
- [14] 李勇, 郭蓓, 黄官飞, 等. 太阳能热发电复合相变蓄热材料的实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(3): 49-53, 95.
- LI Yong, GUO Bei, HUANG Guanfei, et al. Experimental investigation on phase change thermal storage material composite for solar energy thermal power [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(3): 49-53, 95.
- [15] ZHANG Huanzhi, WANG Xiaodong, WU Dezhen. Silica encapsulation of n-octadecane via sol-gel process: a novel microencapsulated phase-change material with enhanced thermal conductivity and performance [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, 343(1): 246-255.
- [16] YUAN Kunjie, WANG Huichun, LIU Jian, et al. Novel slurry containing graphene oxide-grafted microencapsulated phase change material with enhanced thermo-physical properties and photo-thermal performance [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, 143: 29-37.
- [17] 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.
- [18] LIU Aihua, LIN Junjiang, ZHUANG Yijie. PIV experimental study on the phase change behavior of phase change material with partial filling of metal foam inside a cavity during melting [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 187: 122567.
- [19] XU Yang, REN Qinlong, ZHENG Zhangjing, 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: 84-95.
- [20] TAO Y B, YOU Y, HE Y L. Lattice Boltzmann simulation on phase change heat transfer in metal foams/paraffin composite phase change material [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 93: 476-485.
- [21] ZHANG Zhuqian, HE Xiande. Three-dimensional numerical study on solid-liquid phase change within open-celled aluminum foam with porosity gradient [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 113: 298-308.

- [22] TIARI S, MAHDAVI M. Computational study of a latent heat thermal energy storage system enhanced by highly conductive metal foams and heat pipes [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 141(5): 1741-1751.
- [23] MENG Xi, YAN Lianyu, HE Fan. Filling copper foam partly on thermal behavior of phase-change material in a rectangular enclosure [J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 32: 101867.
- [24] JOSHI V, RATHOD M K. Thermal performance augmentation of metal foam infused phase change material using a partial filling strategy: an evaluation for fill height ratio and porosity [J]. *Applied Energy*, 2019, 253: 113621.
- [25] YANG Xiaohu, FENG Shangsheng, ZHANG Qunli, et al. The role of porous metal foam on the unidirectional solidification of saturating fluid for cold storage [J]. *Applied Energy*, 2017, 194: 508-521.
- [26] YANG Xiaohu, BAI Qingsong, GUO Zengxu, et al. Comparison of direct numerical simulation with volume-averaged method on composite phase change materials for thermal energy storage [J]. *Applied Energy*, 2018, 229: 700-714.

(编辑 赵炜 亢列梅)