

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2024.04.007

应用于太阳能储热的膨胀石墨/石蜡复合相变材料的制备与热性能

许立宪¹, 张勇¹, 梁诺¹, 张旭²

(1. 甘肃省建设设计咨询集团有限公司, 兰州 730050; 2. 天津工业大学 航空航天学院, 天津 300387)

摘要: 为了改善太阳能储热用相变材料的性能, 以石蜡为基材, 通过添加分散剂和不同质量分数的膨胀石墨, 制备出具有良好热性能的复合相变材料。实验测试复合相变材料在熔化和凝固过程的温度变化, 分析复合相变材料的蓄放热特性, 并采用参比温度法得出复合相变材料的主要热物性参数。数值模拟复合相变材料的熔化过程, 比较分析温度的模拟值与实验数据, 研究复合相变材料的固液相变化规律和微观流场。结果表明: 添加膨胀石墨可增强相变材料的传热, 提高相变材料的蓄、放热性能, 添加 1.5% 膨胀石墨的相变材料的热导率是纯相变材料的 1.49 倍; 随着膨胀石墨的添加量增加, 复合相变材料黏度增大, 使对流换热强度减弱, 同时复合相变材料的潜热也逐渐降低, 使蓄热量减小; 膨胀石墨添加量(质量分数)为 1.0% 的复合相变材料蓄放热性能最佳, 放热时间比纯相变材料缩短 38.06%; 膨胀石墨的添加量越高, 复合相变材料的熔化速率越快; 膨胀石墨添加量为 1% 的复合相变材料蓄放热性能最佳。

关键词: 太阳能储热; 复合相变材料; 热导率; 相变潜热; 数值模拟

中图分类号: TK512.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2024)04-0036-08

Preparation and thermal performance of expanded graphite/paraffin composite phase change materials for solar thermal storage

XU Lixian¹, ZHANG Yong¹, LIANG Nuo¹, ZHANG Xu²

(1. Gansu Construction Design Consulting Group Co., Ltd., Lanzhou 730050, China; 2. School of Aeronautics and Astronautics, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to improve the performance of phase change material (PCM) for solar thermal storage, composite PCMs with good thermal performance were prepared using paraffin by adding dispersants and different mass fractions of expanded graphite (EG). The temperature changes were tested experimentally during melting and solidification, in order to analyze the heat storage and release characteristics of composite PCMs. And the main thermophysical parameters were obtained using the T-History method. Numerical simulation was carried out to study the solid-liquid phase change and flow field of composite PCMs during melting process, and the numerical temperature were compared with experimental data. The results show that the heat transfer, heat storage, and release performance of PCM are enhanced by adding EG. The thermal conductivity of PCM with 1.5% EG is 1.49 times that of pure PCM. As the EG additive amount increases, the viscosity of composite PCM increases, which weakens the convective heat transfer intensity. And the latent heat of composite PCM also decreases, which decreases the heat storage capacity. The composite PCM with 1% EG addition has the best heat storage and release performance, and its heat release time is shortened by 38.06% compared that of to pure PCM. The higher the amount of EG added, the faster the melting rate of composite PCM. The composite PCM with 1% EG addition has the best heat storage and release performance.

Key words: solar thermal storage; composite phase change materials; thermal conductivity; phase change latent heat; numerical simulation

收稿日期: 2023-10-23

基金项目: 天津市科技计划项目(18JTPJC60200); 甘肃省住房和城乡建设厅科技计划项目(JT2022-48)

通信作者: 许立宪(1981—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为清洁能源。E-mail: 47644446@qq.com

太阳能是最有应用前途的可再生能源之一,加快其利用对实现“双碳”目标具有重要的意义^[1]。太阳能具有间歇性和不稳定性特点,需要配备储能装置^[2]。利用相变材料(phase change material, PCM)潜热进行热能储存的相变蓄热技术,能够增强太阳能的存储和转化性能,提高太阳能热利用效率^[3-4]。例如,在太阳能热水、供热装置和系统中采用相变材料蓄热水箱,除了能够降低传统水箱的容积和占用空间,还可以缓解太阳能由于间歇性和受天气影响造成的供热不稳定的问题^[5-8]。因此其在太阳能高效利用领域有着很好的应用前景^[9]。但是多数相变材料的热导率较低,导致蓄、放热速率很低,严重制约了其广泛应用。

为了克服这个问题,很多学者进行了大量研究。通过添加高导热材料制备复合相变材料,可以达到提高传热性能的目的^[10-13]。高导热材料主要包括碳基材料、金属纳米颗粒和金属氧化物纳米颗粒等^[14]。由于碳基材料具有高纵横比结构,对相变材料的传热性能提升一般比金属和金属氧化物纳米颗粒高^[15-16]。Choi等^[17]选用硬脂酸作为相变材料,采用碳纳米管和石墨烯作为添加剂,制成多种复合相变材料,并实验探究添加剂对复合相变材料传热性能和稳定性影响。Zhang等^[18]把液态石蜡渗入到膨胀石墨(expanded graphite, EG)中,制备了EG/石蜡复合相变材料,并对其热性能和结构性能展开试验探究。Sar等^[19]通过将液态相变材料渗入到膨胀石墨中,制备了不同质量分数的EG/PCM复合材料。高丽媛等^[20]用石蜡作为相变材料,并向其中掺入了多壁碳纳米管,使用两步法制备复合相变材料,并进行热性能测试实验。Zou等^[21]用熔点石蜡、石墨烯和多壁碳纳米管制备复合相变材料,对其热物性及传热性能进行测试。在碳基材料中,膨胀石墨具有成本低、吸附性强、传热效果好等优点,可以改善相变材料的热导率,而且还对自然对流换热有一定的影响^[22-26]。

综上所述,添加膨胀石墨可以改变相变材料的热物性,改善相变材料的传热性能,从而提高太阳能利用系统的综合效率。但随着膨胀石墨添加量的增大,相变材料的传热性能改善效果是否持续增加,以及其他物性如何变化,都需要进行深入地研究。有鉴于此,本文采用石蜡作为相变材料、十二烷基苯磺酸钠(SDBS)作为分散剂,通过添加不同量的膨胀石墨制备膨胀石墨/石蜡复合相变材料(expanded graphite/paraffin composite PCM, EG/P CPCM);实验研究此复合相变材料的熔化、凝固过程热特性,并应用参比温度法得到其主要热物性参数;对复合相变材料的熔化过程进行数值模拟,

分析不同膨胀石墨质量分数的复合相变材料的固液相变化以及微观流动。

1 实验部分

1.1 实验材料和设备

实验材料:石蜡,湖北赛默新能源科技有限公司;膨胀石墨,青岛腾盛达碳素石墨公司;分散剂十二烷基苯磺酸钠,上海盛众精细化工有限公司。

实验设备:JM-B型电子天平,南京东迈科技仪器有限公司;MYP11-2A型电磁搅拌器,上海沪粤明科学仪器有限公司;FS-150N型超声震荡仪,上海生析超声仪器有限公司;恒温加热器,上海精其仪器有限公司。

1.2 复合相变材料制备

复合相变材料具体制备过程如下:

(1)用电子天平称取一定量的石蜡、膨胀石墨和分散剂(SDBS),它们的质量配比如表1所示。

表1 不同EG质量分数的EG/P CPCM的成分配比
Tab.1 Mix ratios of EG/P CPCM with different EG mass fractions

PCM 质量/g	EG 质量/g	EG 质量分数/%	SDBS 质量/g
29.85	0.15	0.5	0.3
29.76	0.24	0.8	0.3
29.70	0.30	1.0	0.3
29.64	0.36	1.2	0.3
29.55	0.45	1.5	0.3

(2)将配比好的石蜡、膨胀石墨和分散剂放入烧杯,用加热器加热,直至复合材料完全熔化。

(3)将烧杯放置在电磁搅拌器上搅拌,电磁搅拌器的温度设定为65℃、转速设为600 r/min、搅拌时间设为90 min。

(4)搅拌完成后,将烧杯放置到65℃的恒温加热器中进行超声振荡120 min,即制得复合相变材料。

1.3 热性能测试

为了得到复合相变材料的蓄热、放热(熔化、凝固)特性,对其进行热性能测试。热性能测试实验装置主要包括:热电偶、试管、恒温液浴槽、数据采集仪(安捷伦34970A)、计算机等,如图1所示。

具体测试步骤为:①将各种复合相变材料装入到试管中并编号;②在每个装有复合相变材料的试管中插入热电偶,插入时要尽量保证热电偶的探头在复合相变材料的正中心处;③将试管放入到恒温液域槽中加热到65℃,检测并记录复合相变材料的温度变化,直到其完全熔化;④迅速将试管放入到25℃的恒温

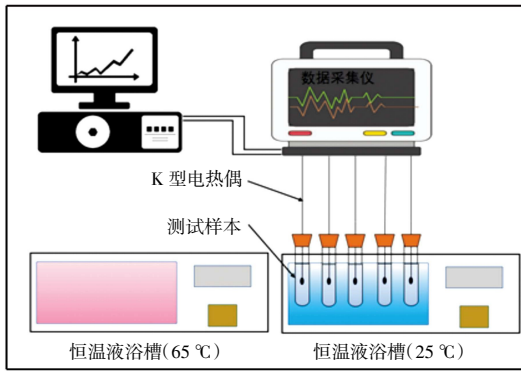


图 1 传热性能测试系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of heat transfer performance testing system

液浴槽中进行冷却,记录复合相变材料的温度变化,直到其完全凝固。

1.4 热物性测定

在热性能测试得到相变材料蓄放热温度变化曲线的基础上,采用参比温度法^[27]测定复合相变材料的热物性。参比温度法具有测试时间短、成本低的优点,且可以同时测试多组材料热物性。该方法的原理是先将参考材料(本文采用纯水,其热物性已知)和若干组同等质量的测试材料(各种复合相变材料)放入同一规格的试管内,再将所有试管置于某一高温环境中加热,直到所有材料温度均达到此高温环境温度,最后迅速将它们置入某一低温环境冷却,直到所有材料温度均降到此低温环境温度。相变材料(测试材料)和水(参考材料)的降温曲线,分别如图 2 和图 3 所示。图中: T_0 为初始温度; T_{m1} 和 T_{m2} 为相变材料开始相变和相变结束的温度; T_∞ 为环境温度; T_a 、 T_b 分别为开始和结束对比温度; A_1 、 A_2 分别为所在阴影部分的面积; t_1 、 t_2 分别为相变开始和结束的时间。根据降温曲线建立热力学方程,输入参考材料的热物性即可得到测试材料的热物性。

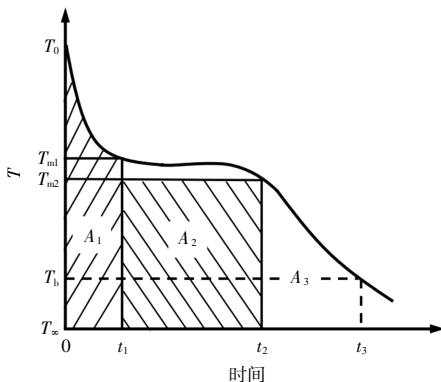


图 2 PCM 降温曲线

Fig.2 PCM cooling curve

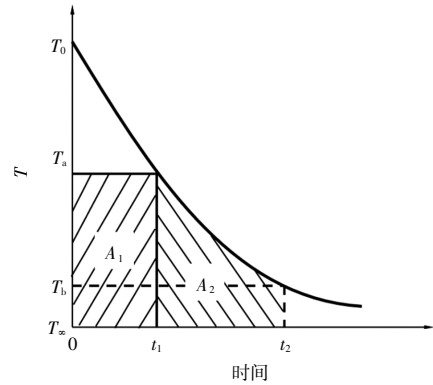


图 3 水降温曲线

Fig.3 Water cooling curve

2 数值模拟

2.1 物理模型建立

为了进一步探究复合相变材料熔化过程中的固液相变化和传热机理,对其熔化过程进行数值模拟。模拟尽量与试验参数保持一致,实验用试管和其物理模型如图 4 所示,试管的高度为 100 mm、壁厚为 1 mm、直径为 18 mm。

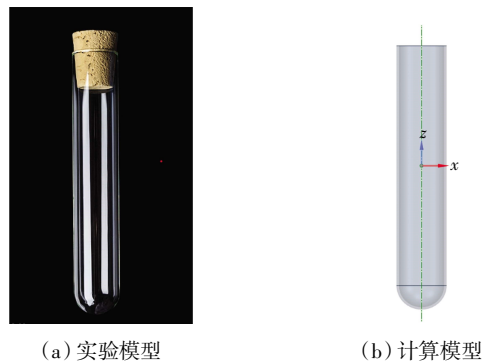


图 4 试管的实验模型和计算模型

Fig.4 Experimental and computational models of test tube

为了方便研究,进行以下合理假设:

- (1) 各种复合相变材料均被视为单相流体且均为纯净、各向同性,相变传热过程中与外界没有进行任何物质交换。
- (2) 各种复合相变材料在液态时均视为不可压缩。
- (3) 各种复合相变材料在固态时主要以导热方式传递热量,并遵守傅里叶定律。
- (4) 各种复合相变材料在液态时的热物性仅与温度有关。
- (5) 液态复合相变材料的自然对流满足 Boussinesq 假设,即只考虑浮升力项的影响并忽略在固/液相转变时其密度的变化。
- (6) 各种复合相变材料在熔化过程中,两相区中

液相率也要和温度成线性关系。

(7) 各种复合相变材料的潜热值与温度变化无关。

2.2 控制方程

根据以上假设,柱坐标下的控制方程为:

质量守恒方程为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(u_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial u_r}{\partial \tau} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_y \frac{\partial u_r}{\partial y} = X_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \nabla^2 u_r \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_\theta}{\partial \tau} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{u_r u_\theta}{r} + u_y \frac{\partial u_\theta}{\partial y} = X_\theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \nu \nabla^2 u_\theta \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial \tau} + u_r \frac{\partial u_y}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_y}{\partial \theta} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} = X_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 u_y \quad (4)$$

能量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial \tau} + \nabla(\rho u H) = \nabla(\lambda \nabla H) + S \quad (5)$$

式中:下标 r, θ, y 分别表示柱坐标下 3 个方向; τ 为时间; u 为流速; p 为压力; ρ 为密度; X 为体积力; ν 为动力黏度; H 为焓; λ 为热导率; S 为源项。

2.3 边界与初始条件

热性能试验时,试管顶部用软木塞密封,其余部分浸在 65 °C 恒温水浴中加热。因此,将顶面设置为绝热壁面,其他壁面设为恒壁温 338 K,初始时计算域温度为 298 K。

2.4 网格划分与计算参数设置

采用 Quad-Pave 网格对计算域进行网格划分,如图 5 所示。经过网格和时间步长独立性测试,确定网格数量为 36.8×10^5 ,时间步长为 0.01 s。

采用 ANSYS FLUENT 软件进行计算,选取 Mleting/Solidification 模型,利用非稳态求解器求解。重力加速度的方向设为 $-y$ 方向,数值为 9.8067 m/s^2 。压力和速度耦合方程均选用 PISO 算法,压力松弛因子参数设为 0.1,密度松弛因子和能量方程的松弛因子参数均设为 1,动量方程的松弛因子参数设为 0.3;动量和能量控制方程均采用 QUICK 算法,压力模型的修正方程采用 PERSTO 算法。

2.5 计算模型验证

为了验证数值方法的可靠性,将石蜡熔化过程温度的模拟值和实验数据进行比较,如图 6 所示。



图 5 网格划分

Fig.5 Meshing

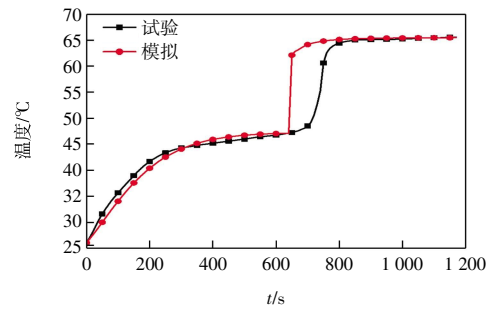


图 6 石蜡熔化过程的模拟值和实验数据

Fig.6 Simulation results and experimental data of paraffin melting process

由图 6 可见,在相变前阶段,模拟值稍低于实验值,这可能是因为实验中热电偶的探头没有放置在试管的正中心位置,或者由于震动、水的流动等使热电偶探头有微小位移。在之后过程中,模拟值稍高于实验值且模拟过程更早完全熔化,这可能是模拟忽略了试管壁厚,导致传热热阻比实际低。尽管实验和模拟的石蜡熔化过程温度结果存在一些差别,但它们的变化趋势是一致的,两者能够较好地吻合,证明本研究采用的数值方法准确可靠。

3 结果与讨论

3.1 热性能实验结果与分析

图 7 比较了不同质量分数的 EG/P CPCM 在熔化过程中温度的变化。

由图 7 可以看出,在相变前阶段,纯 PCM 和 5 种不同质量分数 EG/P CPCM 的温度均快速地增长,但 5 种不同质量分数的 EG/P CPCM 有更快的温升速率,并且添加的 EG 量越多,温升速率越快。从 25 °C 升高到 42.5 °C,纯 PCM 所需要的时间是 220 s,而 EG 添加量

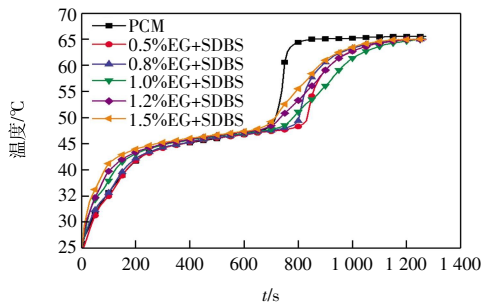


图 7 各种 EG/PCM 的熔化过程温度曲线

Fig.7 Temperature curves of various EG/PCM melting process

(质量分数,下同)为 0.5%、0.8%、1.0%、1.2%、1.5%的复合相变材料,所需要的时间分别为 215 s、210 s、170 s、160 s、140 s, 分别缩短了 2.27%、4.55%、22.73%、27.27%、36.36%。这是因为相变前阶段,温升速度主要取决于各 EG/P CPCM 的热导率,EG 添加量越大,热导率提升越高。

在相变阶段,纯 PCM 和 5 种不同质量分数的 EG/P CPCM 的温度均增加非常缓慢,且 EG 质量分数越高,相变阶段时间越短。这主要是因为进入相变阶段,纯 PCM 和各 EG/P CPCM 均利用潜热吸收大量的热量,以至温度上升缓慢。此外,随着 EG 添加量的增加,PCM 份额逐渐降低,复合相变材料的潜热减小,从而导致相变阶段维持的时间减少。

在完全熔化后,纯 PCM 和 5 种不同质量分数的 EG/P CPCM 的温度又快速上升,但它们的温升速率有些差别,EG 添加量超过 1.0%的 EG/P CPCM 比其他材料的温升斜率要小。这可能是因为添加高质量分数的 EG 会增大液态 PCM 的黏性,从而阻碍对流传热。简言之,随着 EG 添加剂量的增多,EG/P CPCM 的热导率增加,但复合 PCM 的黏度也增加,进而抑制液态复合 PCM 的自然对流换热。

图 8 比较了不同质量分数的 EG/P CPCM 复合材料在凝固过程中温度的变化。

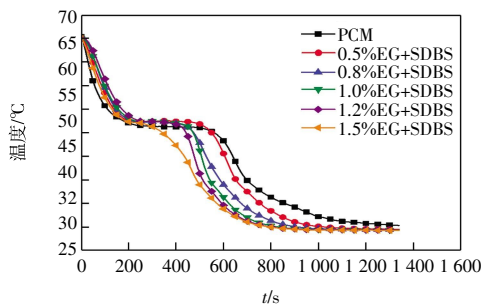


图 8 各种 EG/PCM 的凝固过程温度曲线

Fig.8 Temperature curves of solidification process for various EG/PCM

由图 8 可以看出,在整个凝固过程中,5 种不同质量分数 EG/P CPCM 均比纯 PCM 具有更高的温度下降速率,且随 EG 的质量分数增高,温度下降程度也越大。对于纯 PCM,温度从 65 °C 下降到 25 °C 所需的时间是 1340 s;而 EG 的添加量分别为 0.5%、0.8%、1.0%、1.2% 和 1.5% 的复合相变材料,所需的时间分别为 1030 s、910 s、830 s、800 s 和 780 s,分别缩短 23.13%、32.09%、38.06%、40.30%、41.80%。简言之,添加 EG 可显著提高 PCM 的放热速率,但添加量超过 1.0% 时,EG 对 PCM 的放热速率提升效果会变弱。综合以上,可以认为 EG 添加量为 1% 的复合相变材料具有最佳的蓄放热性能。

3.2 热物性试验结果和分析

采用参比温度法进行各种复合相变材料的热物性测定,图 9 和图 10 显示了不同质量分数的 EG/P CPCM 的热导率和潜热。

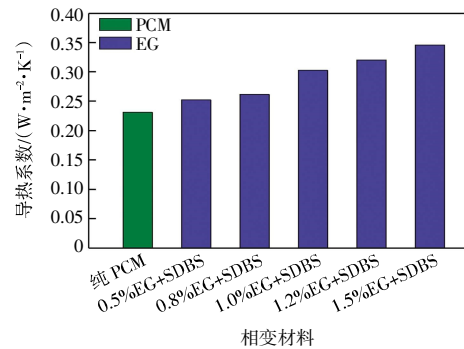


图 9 不同 EG 质量分数的 EG/PCM 的导热系数

Fig.9 Thermal conductivity of EG/PCMs with different EG mass fractions

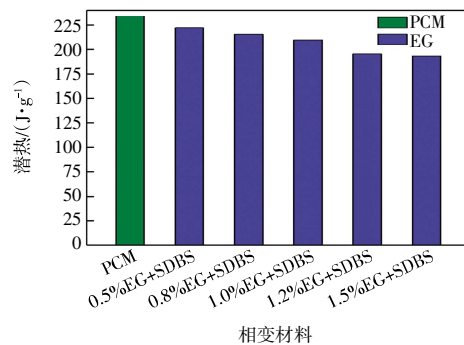


图 10 不同质量分数的 EG/P CPCM 的潜热

Fig.10 Latent heat of EG/P CPCM with different EG mass fractions

由图 9 和图 10 可以看出,EG 可以提高相变材料的热传导率,且热传导率会因 EG 添加量的增多而升高。比如,EG 添加量为 1.5% 的 EG/P CPCM 的热传导率为 0.345 8 W/(m²·K),是纯 PCM 的 1.49 倍。但是,随着 EG 添加量的增大,复合相变材料的相变潜热值

逐渐下降。这主要是因为添加剂的量增多,复合相变材料中更多的 PCM 被取代,故其潜热值会下降。也就是,EG 添加量存在最优值,此最优值使 PCM 热导率有较明显改善,而潜热又不会降低过多。最后,表 2 汇总了各种 EG/PCMs 的主要热物性参数。

3.3 熔化过程模拟结果和分析

图 11 显示了不同质量分数的 EG/P CPCMs 在熔化过程中固/液体随时间的变化,从左到右 EG 添加量依次是 0.5%、0.8%、1.0%、1.2%、1.5%。

由图 11 可以看出,5 种 EG/PCM 的熔化趋势基本

表 2 各种 EG/P CPCMs 的热物性参数

Tab.2 Thermophysical parameters of various EG/P CPCMs

相变材料	相变温度/ ℃	潜热/ (J·g ⁻¹)	热导率/ (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
PCM	47.1	235.10	0.231 2
PCM+1.0%EG	48.3	208.00	0.240 1
PCM+0.5%EG+SDBS	47.2	221.97	0.252 1
PCM+0.8%EG+SDBS	47.3	215.64	0.261 8
PCM+1.0%EG+SDBS	47.5	209.74	0.302 6
PCM+1.2%EG+SDBS	47.9	195.48	0.320 4
PCM+1.5%EG+SDBS	48.2	193.38	0.345 8

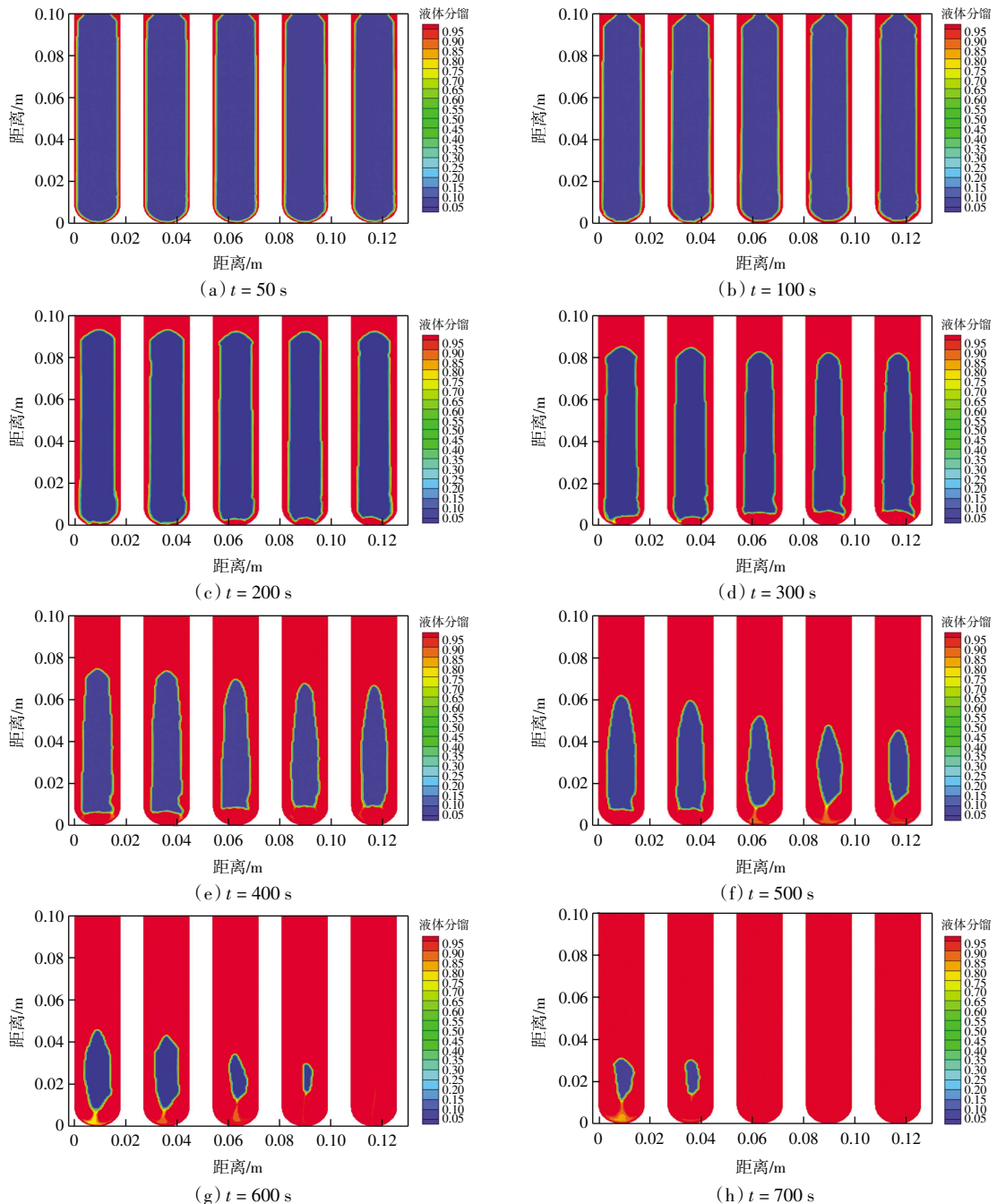
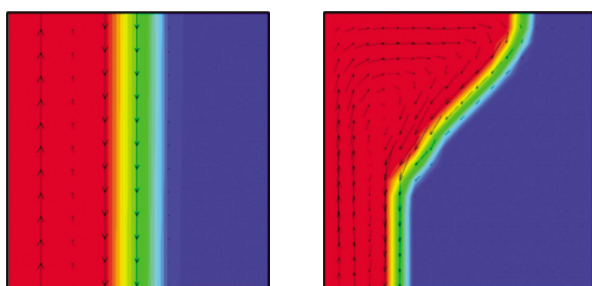


图 11 不同质量分数的 EG/PCM 在熔化过程中固-液体积分数随时间变化情况

Fig.11 Plots of solid-liquid integral numbers of EG/PCM with different mass fractions over time during melting

一致,且均是从四周向内部熔化。前 100 s 熔化速率相差不大,之后出现了明显差别,添加 EG 量越多的 EG/P CPCM 熔化速率越快。 $t = 600$ s 时,EG 添加量为 1.5% 的 EG/P CPCM 首先完全熔化,这是因为其传热性能最好且相变潜热最小。EG 添加量为 1.2% 和 1.0% 的 EG/P CPCM 也很快完全熔化,而 EG 添加量为 0.5% 和 0.8% 的 EG/P CPCM 在 700 s 时却还未完全熔化。

由图 11 还可看出,顶部相变材料的熔化速度比底部的快。当加热开始时,贴近试管壁面的复合相变材料的温度快速升高并熔化,这些熔化的材料会在壁面形成一个液态薄层,这时传热方式以导热为主。随着加热过程的进行,熔化的相变材料量越来越多,贴近壁面的流体和贴近相变材料的流体会因温差的存在形成一定的密度差,在浮升力和重力的作用下近壁面的热流体向上流动,近相变材料的冷流体会向下流动,从而形成环流,即自然对流,如图 12 所示。此时,对流换热成为了主要的传热方式,比加热初期的导热形式有更好的传热效果。



(a) 壁面流线图

(b) 顶部流线图

图 12 $t = 100$ s 时,EG/PCM 的顶部和壁面流线Fig.12 Streamline plots of top and wall of EG/PCM at $t = 100$ s

4 结 论

为了改善太阳能蓄热系统的热性能,在石蜡中添加膨胀石墨制备复合相变材料;采用实验测试和数值模拟研究复合相变材料的熔化和凝固过程热特性,分析膨胀石墨质量分数对复合相变材料的主要热物性参数和熔化过程中固液相变化的影响,得到的主要结论如下:

(1) 添加膨胀石墨可显著增强相变材料的传热,从而提高其蓄、放热性能,添加 1.5% 膨胀石墨的 EG/PCM 的热导率是纯相变材料的 1.49 倍。

(2) 随膨胀石墨的添加量增多,复合相变材料的热导率升高,但其潜热值也下降;随膨胀石墨的添加量增多,复合相变材料的黏度增加,液态相变材料的

对流换热遭到抑制。

(3) 膨胀石墨的添加量越高,复合相变材料的熔化速率越快,且顶部的相变材料熔化速率快于底部的。膨胀石墨添加量为 1.0% 时,膨胀石墨相变材料的蓄放热性能最佳。

参考文献:

- [1] SEDDEGH S, WANG X L, HENDERSON A D, et al. Solar domestic hot water systems using latent heat energy storage medium: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 49: 517-533.
- [2] 李安桂, 史丙金, 张婉卿, 等. 基于太阳能利用的相变蓄热水箱结构优化[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(2): 217-224.
LI A G, SHI B J, ZHANG W Q, et al. Structure optimization of phase change thermal storage water tank based on solar energy utilization[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(2): 217-224 (in Chinese).
- [3] TERHAN M, ILGAR G. Investigation of used PCM-integrated into building exterior walls for energy savings and optimization of PCM melting temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 369: 130601.
- [4] HU J, ZHANG S, DU G, et al. Assembling and properties characterization of boron nitride-chitosan porous structure embedded low supercooling and shape stable sodium acetate trihydrate based phase change materials[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023, 253: 112212.
- [5] 崔海亭, 王振辉, 郭彦书, 等. 圆柱形相变蓄热器蓄/放热性能实验研究[J]. *太阳能学报*, 2009, 30(10): 1188-1192.
CUI H T, WANG Z H, GUO Y S, et al. Experimental study on heat performance of new phase change thermal energy storage unit[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2009, 30(10): 1188-1192 (in Chinese).
- [6] 方桂花, 张伟, 刘殿贺, 等. 基于球形封装的相变储热装置的蓄放热实验研究[J]. *建筑科学*, 2020, 36(10): 134-139.
FANG G H, ZHANG W, LIU D H, et al. Experimental study on heat storage and exothermic of phase change heat storage device based on spherical package[J]. *Building Science*, 2020, 36(10): 134-139 (in Chinese).
- [7] 俞准, 王姜, 严中俊, 等. 生活水箱内相变材料封装结构改进及熔化性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(11): 215-222.
YU Z, WANG J, YAN Z J, et al. Study on improvement and melting performance of phase change material encapsulated structure in domestic hot water tank[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(11): 215-222 (in Chinese).
- [8] CARMONA M, RINCÓN A, GULFO L. Energy and exergy model with parametric study of a hot water storage tank with

- PCM for domestic applications and experimental validation for multiple operational scenarios[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 222: 113189.
- [9] ZHANG D H, WANG J Q, LIN Y G, et al. Present situation and future prospect of renewable energy in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 865–871.
- [10] LI T X, LEE J H, WANG R Z, 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.
- [11] XIA L, ZHANG P, WANG R Z. Preparation and thermal characterization of expanded graphite/paraffin composite phase change material[J]. *Carbon*, 2010, 48(9): 2538–2548.
- [12] 王元明, 丁云飞, 吴会军. 石蜡/碳纳米管复合相变材料的性能研究[J]. *现代化工*, 2015, 35(1): 130–134.
WANG Y M, DING Y F, WU H J. Performance of paraffin/carbon nanotube composite phase change material[J]. *Modern Chemical Industry*, 2015, 35(1): 130–134 (in Chinese).
- [13] TENG T P, CHENG C M, CHENG C P. Performance assessment of heat storage by phase change materials containing MWCNTs and graphite[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50(1): 637–644.
- [14] MISHRA A K, LAHIRI B B, PHILIP J. Superior thermal conductivity and photo-thermal conversion efficiency of carbon black loaded organic phase change material[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, 285: 640–657.
- [15] HAMIDI Y, AKETOUANE Z, MALHA M, et al. Integrating PCM into hollow brick walls: Toward energy conservation in Mediterranean regions[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 248: 111214.
- [16] MARANI A, NEHDI M L. Integrating phase change materials in construction materials: Critical review[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 217: 36–49.
- [17] CHOI D H, LEE J, HONG H, et al. Thermal conductivity and heat transfer performance enhancement of phase change materials (PCM) containing carbon additives for heat storage application[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 42: 112–120.
- [18] ZHANG Z G, FANG X M. Study on paraffin/expanded graphite composite phase change thermal energy storage material [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(3): 303–310.
- [19] SAR 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.
- [20] 高丽媛, 杨宾, 郝梦琳, 等. 碳纳米管/石蜡复合相变材料热性能的实验研究[J]. *应用化工*, 2019, 48(4): 752–754, 761.
- GAO L Y, YANG B, HAO M L, et al. Experimental study on thermal properties of carbon nanotube/paraffin composite phase change materials[J]. *Applied Chemical Industry*, 2019, 48(4): 752–754, 761 (in Chinese).
- [21] ZOU D Q, MA X F, LIU X S, et al. Thermal performance enhancement of composite phase change materials (PCM) using graphene and carbon nanotubes as additives for the potential application in lithium-ion power battery[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 120: 33–41.
- [22] WANG Y M, MI H Y, ZHENG Q F, et al. Graphene/phase change material nanocomposites: Light-driven, reversible electrical resistivity regulation via form-stable phase transitions[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(4): 2641–2647.
- [23] XIAO X, ZHANG P, LI M. Experimental and numerical study of heat transfer performance of nitrate/expanded graphite composite PCM for solar energy storage[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 105: 272–284.
- [24] HE J S, YANG X Q, ZHANG G Q. A phase change material with enhanced thermal conductivity and secondary heat dissipation capability by introducing a binary thermal conductive skeleton for battery thermal management[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 148: 984–991.
- [25] YUAN M D, XU C, WANG T Y, et al. Supercooling suppression and crystallization behaviour of erythritol/expanded graphite as form-stable phase change material[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 413: 127394.
- [26] HUANG X B, CHEN X, LI A, et al. Shape-stabilized phase change materials based on porous supports for thermal energy storage applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 356: 641–661.
- [27] 王赞社, 杨利生, 胡显威, 等. 参比温度曲线法的改进与实验研究[J]. *制冷学报*, 2017, 38(6): 34–38, 45.
WANG Z S, YANG L S, HU X W, et al. Improvement and experimental study of the T-history method[J]. *Journal of Refrigeration*, 2017, 38(6): 34–38, 45 (in Chinese).

本文引文格式:

许立宪,张勇,梁诺,等. 应用于太阳能储热的膨胀石墨/石蜡复合相变材料制备与热性能[J]. *天津工业大学学报*, 2024, 43(4): 36–43.

XU L X, ZHANG Y, LIANG N, et al. Preparation and thermal performance of expanded graphite/paraffin composite phase change materials for solar thermal storage[J]. *Journal of Tianjgong University*, 2024, 43(4): 36–43(in Chinese).