

储能材料与器件

泡沫铁/石蜡复合相变储能材料放热过程及其热量传递规律

万倩, 何露茜, 何正斌, 伊松林

(北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083)

摘要: 石蜡作为相变储能材料具有储能密度大的优势, 但其导热率较低。以石蜡作为相变储能材料、金属泡沫铁作为导热增强材料, 通过对泡沫铁/石蜡复合相变储能材料的制备及其放热过程测试, 探究了两种厚度金属泡沫铁对石蜡放热过程的强化作用和传热过程。结果表明, 泡沫铁能缩短石蜡放热时间, 提高放热效率。相比对照组, 厚 10 mm 和 15 mm 的泡沫铁/石蜡复合相变储能材料相变时间分别缩短了 1/3 和 1/4, 相变放热密度分别减小了 1.60% 和 3.26%, 两者的相变放热速率是相应对照组的 1.44 和 1.27 倍。同时, 还对 15 mm 泡沫铁/石蜡复合相变储能材料放热过程中, 对流换热系数与相变时间和材料温度的关系分别进行了模拟, 得到相应的理论公式, 该公式所求得的模拟值与实际值较接近, 可用于预测不同放热时间或材料温度下复合相变储能材料的换热能力。

关键词: 太阳能干燥; 相变储能材料; 石蜡; 泡沫铁; 放热时间

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2019.0280

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2020) 04-1098-07

Exothermic process and heat transfer of iron foam/paraffin composite phase change energy storage materials

WAN Qian, HE Luxi, HE Zhengbin, YI Songlin

(College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: As a phase change material (PCM), paraffin exhibits high energy storage density. However, its thermal conductivity is low. In this study, paraffin wax was used as the PCM, whereas iron foam was used as the thermal-conductivity-enhancing material. The heat transfer performance of two types of iron foam during the paraffin exothermic process was explored by preparing the iron foam/paraffin composite phase change energy storage material and conducting its exothermic process test. The results denote that iron foam can reduce the heat release time of paraffin and improve the heat release efficiency. The phase transition times of the iron foam/paraffin composite PCMs having thicknesses of 10 and 15 mm are reduced by 1/3 and 1/4, respectively, and the phase change heat release densities are reduced by 1.60% and 3.26%, respectively, whereas the phase change heat release rates are 1.44 and 1.27 times that of the corresponding control group. Simultaneously, during the heat release process of 15 mm iron foam/paraffin composite PCM, the relation between the convective heat transfer coefficient, phase transition time, and material temperature was simulated, and corresponding theoretical formulas were obtained. The simulated value obtained by this formula is similar to the measured value. Thus, this formula can be used to predict the convective heat transfer coefficient of composite PCMs under different heat release times or material temperatures.

Key words: solar energy drying; phase change energy storage material; paraffin wax; iron foam; heat release time

收稿日期: 2019-12-13; 修改稿日期: 2019-12-24。

基金项目: “十三五”国家重点研发计划 (2016YFD0600701), “十三五”国家重点研发计划 (2018YFD0600305)。

第一作者: 万倩 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为太阳能木材干燥储热材料, E-mail: wanqian@bjfu.edu.cn; 联系人: 何正斌, 副教授, 研究方向为木材加工热处理, E-mail: hzbcailiao@bjfu.edu.cn。

近年来,随着能源供需矛盾的持续扩张^[1]及生态环境的日益恶化,对可再生新能源的研发日益迫切。合理发展新能源能够优化我国的能源消费结构,减少化石能源消费^[2],响应党的十九大报告所提出的加快生态文明体制改革,建设美丽中国的战略部署^[3]。太阳能清洁环保,是一种应用潜力极大的可再生新能源^[4-6],但其供应受到气候地理等因素的严重制约^[7-8],开发储能技术可以一定程度上克服这些缺陷^[9-11]。相变储能相比其他储能方式具有储能密度高,相变温度恒定,体积变化小,环境友好及成本较低等诸多优势^[12-14]。石蜡是中低温相变范围内常用的一种有机相变储能材料(PCM)^[15],具有相变潜热量大、相变温度范围广、价格低等优点^[16],但石蜡较低的热导率限制了其相变过程中的传热效率^[17]。泡沫金属具有质轻,比表面积大及热导率较高等优势^[18-19],制备泡沫金属/石蜡复合相变储能材料可弥补石蜡热导率较低的缺陷,实现石蜡的高效储放热。

目前国内外有许多关于泡沫金属增强石蜡储能效果的研究。徐众等^[20]对优选温度和时间下制备的复合相变材料的温度场分布情况和导热系数进行测试。结果表明,蓄-放热过程中泡沫铜/石蜡复合材料稳定性最好,温度分布最均匀。魏高升等^[21]重点分析了泡沫金属基复合相变材料有效导热系数与泡沫金属孔隙率以及孔径的关系。结果表明,泡沫金属可以显著提高相变材料的导热系数。Wang等^[22]通过实验验证了复合相变储能材料比纯石蜡具有更好的温度均匀性,且泡沫铝的添加可以提高相变储能材料的储热率。但现有研究大多数集中于泡沫金属的孔隙率、孔径及储热材料的有效导热系数,缺乏对实际系统的应用过程及对流换热能力的研究。因此,本文以石蜡作为研究对象,以其放热过程中温度变化为基础,探究了泡沫金属厚度对强化传热的影响效果,并且根据实际对流换热系数与放热时间及材料温度的关系建立了相应的关系式,为石蜡在实际放热过程中的应用提供理论依据。

1 实验材料和方法

1.1 材料与设备

石蜡:54号半精炼石蜡,熔融温度范围43~60℃,潜热184.4 J/g^[23];泡沫铁:孔隙率98%,长度100 mm,宽度100 mm,厚度15 mm和10 mm,

苏州佳士德泡沫金属有限公司生产;金属盒:长度110 mm,宽度150 mm,厚度15 mm和10 mm。泡沫铁及金属盒实物图如图1所示。

材料制备所用设备:智能型电热板(北京昶信科技发展有限公司)。实验所用设备:主要有干燥箱(北京汇安铭科科技发展有限公司)和温度采集系统,其中温度采集系统包括:温度传感器铠装热电偶(北京航科金星自动化仪表有限公司),温度巡检仪(北京中旺新业电子有限公司)和在线温度采集系统(电脑)。

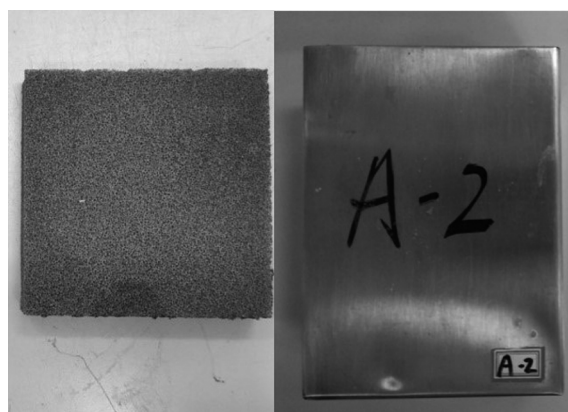


图1 泡沫铁及金属盒实物图

Fig.1 Physical figure of iron foam and metal box

1.2 实验方法与步骤

1.2.1 泡沫铁/石蜡复合相变储能材料的制备

两种厚度复合相变储能材料的制备如图2所示,取一块体积为100 mm×100 mm×15 mm的泡沫铁,两个体积为110 mm×150 mm×15 mm的金属盒,称重。将泡沫铁放入其中一个金属盒中,作为实验组,另一个空金属盒为对照组。把已填装泡沫铁的金属盒及空金属盒固定在铁架上。在电热板200℃条件下对固体石蜡进行加热至完全熔化。将液体石蜡注入金属盒内,当石蜡完全浸没泡沫铁时,注蜡完成。在室温下冷却至石蜡完全凝固,制备得到厚度为15 mm的相变储能材料,称重。将前后两次称重结果相减即得到灌注石蜡的质量。对体积为100 mm×100 mm×10 mm的泡沫铁重复以上操作,对应的金属盒体积为110 mm×150 mm×10 mm,制备得到厚度为10 mm的相变储能材料。本实验中10 mm和15 mm泡沫铁的质量分别为50.3 g和40.3 g,相应厚度的复合相变储能材料中灌注石蜡的质量为123.18 g和188.27 g,相应对照组中石蜡的质量为

125.18 g 和 194.61 g。这里 10 mm 的泡沫铁比 15 mm 的泡沫铁更重是由于前者的密度比后者的更大。

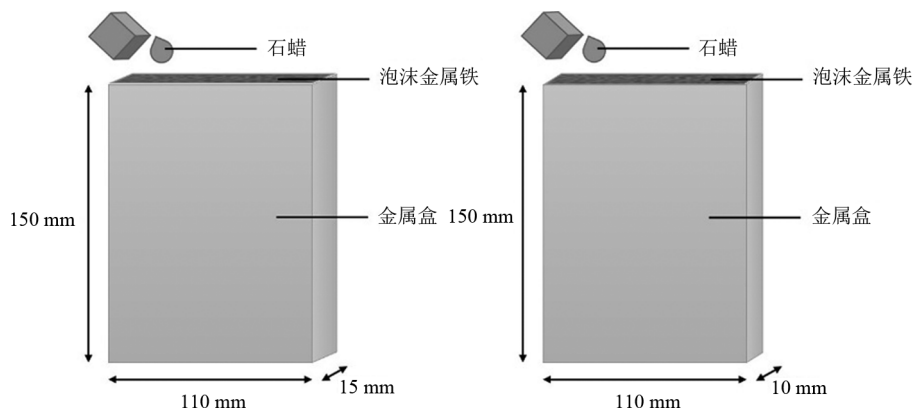


图2 两种厚度复合相变储能材料制备示意图

Fig.2 Structure schematic of preparation of two thickness composite PCMs

1.2.2 复合相变储能材料放热过程温度测量

实验装置及传感器分布示意图如图3所示。在 10 mm 厚的相变储能材料开口端短边的中心线上，用直径 1 mm 的钻头钻两个孔，孔的中心分别位于试件的中心层和外层。将温度传感器分别插入对应的孔中，记录传感器位置并编号#1'和#2'。将复合相变储能材料快速放入温度为 70.0 °C 的干燥箱中进行加热处理，通过在线温度采集系统，观察正在升温的试件内部的温度，温度的测量精度为小数点后一位。当中心层温度上升到 60.0 °C 时，石蜡已完全熔化。关闭干燥箱加热器，打开箱门，在风机的作用下使干燥箱内部温度冷却至 25.0 °C，开始降温。测定复合相变储能材料内部的温度，至试件中心层温度降至 30.0 °C 以下，石蜡内部已经完全凝固，结束降温过程，完成放热过程温度测量。对厚度为 15 mm 的试件重复以上步骤，将传感器编号为#1 和#2。每组实验重复 3 次，取平均值。

2 实验结果与讨论

2.1 温度变化规律

放热过程中，10 mm 和 15 mm 泡沫铁/石蜡复合相变储能材料内部的温度变化如图4和5所示。观察发现，随着时间的增加，储能材料内部温度持续下降，均出现了三段相似的降温曲线，以石蜡中心层的降温曲线为例，可分为 $T_{05} \sim T_{15}$ 、 $T_{15} \sim T_{25}$ 和 $T_{25} \sim T_{35}$ 三段。

第一个降温阶段 $T_{05} \sim T_{15}$ 为显热放热阶段，石

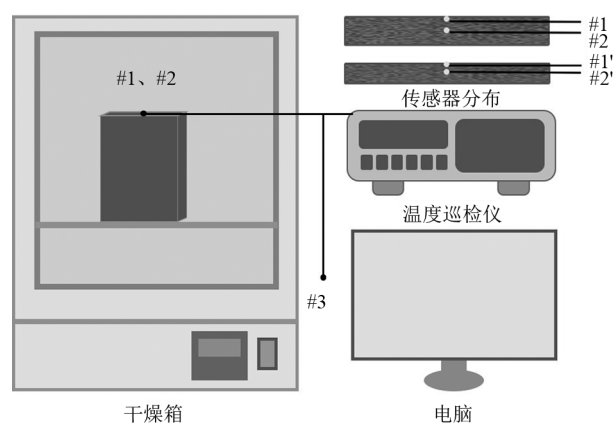


图3 实验装置及传感器分布示意图

Fig.3 Experimental setup and sensor distribution diagram

蜡基本呈液态，持续放热，温度下降较快。由于这一阶段比热容较小^[23]，由比热容公式 $Q = cm\Delta t$ [Q 为储能材料放出的热量，J； c 为比热容，J/(kg·°C)； m 为储能材料的质量，kg； Δt 为放热后储能材料降低的温度，°C] 可知，石蜡放出的热量比较少。第二个降温阶段 $T_{15} \sim T_{25}$ 出现了恒温相变平台，这时石蜡处于相变放热阶段，相态逐渐从液态转变为固态，持续放热，温度基本保持不变或下降速度较慢。由于这一阶段进行相变潜热的释放^[23]，因此放热量较大，相变储能材料主要利用的就是这一阶段放出的热量。

持续一段时间后，石蜡的相变阶段结束，进入第三个降温阶段 $T_{25} \sim T_{35}$ ，即显热放热阶段，石蜡基本完全凝固，随着温度的下降逐渐放热。这一阶段降温速率逐渐减小，因为放热开始时，靠近金属盒外壁的石蜡相较于中心层的石蜡更快地完成了凝

固过程，随后材料内部的热量只能以导热的形式传递到流体中。根据傅里叶定律 $\phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x}$ ，其中， ϕ 为单位时间内通过储能材料截面的热量，W； λ 为导热系数，W/(m·K)； A 为储能材料传热截面的面积，m²； $\frac{\partial t}{\partial x}$ 为垂直于传热截面方向上的温度梯度，K/m。降温过程中储能材料表面温度接近环境温度，随着内部温度的降低，传热截面方向上的温度梯度逐渐减小，导致单位时间内通过储能材料截面的热量逐渐减少，因而传热速率减慢^[24]。同时，石蜡的固-固相变也起到一定的影响。

与纯石蜡对照组相比较，两种厚度的泡沫铁/石蜡复合相变储能材料中心层及外层的温度下降趋势均更快。这表明在石蜡放热过程中，由于泡沫铁的导热系数较高，泡沫铁对热传导的增强作用强于其对自然对流的抑制作用^[22]，因此添加了泡沫铁后整体的降温效果更好。厚度为15 mm时，两组材料中心层与外层的温度差更为显著，这是因为厚度增加使得毕渥数 Bi 增大，因而材料的中心层和外层产生了一定的温度差^[23,25]。

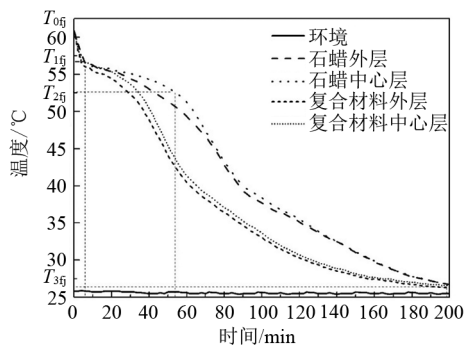


图4 10 mm复合相变储能材料内部温度变化规律
Fig.4 Temperature of PCM in metal foam with thickness of 10 mm

由于石蜡的熔融温度范围为43~60℃^[23]，因此认为60.0℃和43.0℃为降温过程中材料开始与结束相变的温度，记录与之对应的各储能材料开始相变的时间 $t_{1\phi}$ 和结束相变的时间 $t_{2\phi}$ ，并计算相变过程持续时间 Δt_{ϕ} ，制成表1和表2。由于泡沫铁/石蜡复合相变储能材料及其对照组大致都是从60.0℃开始降温，因此进入相变阶段的时间大致相同。比较相变放热全过程的持续时间，10 mm和15 mm的复合相变储能材料比其对照组分别缩短了25 min和

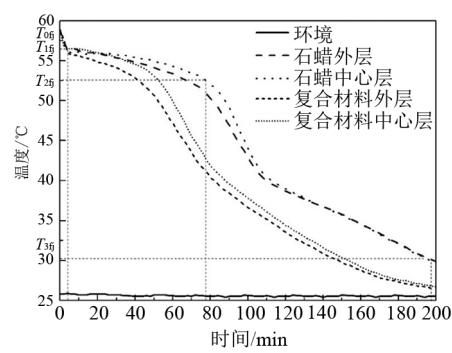


图5 15 mm复合相变储能材料内部温度变化规律
Fig.5 Temperature of PCM in metal foam with thickness of 15 mm

表1 10 mm相变储能材料降温曲线特征值
Table 1 Characteristic value of cooling curve of 10 mm PCM

材料种类	厚度/mm	$t_{1\phi-10}$ /min	$t_{2\phi-10}$ /min	$\Delta t_{\phi-10}$ /min	$T_{1\phi-10}/^{\circ}\text{C}$	$T_{2\phi-10}/^{\circ}\text{C}$
泡沫铁	10	1	55	54	60.0	43.0
纯石蜡	10	1	80	79	60.0	43.0

注： $t_{1\phi-10}$ 、 $t_{2\phi-10}$ 、 $\Delta t_{\phi-10}$ 分别表示厚10 mm的相变储能材料开始、结束相变的时间及相变持续时间， $T_{1\phi-10}$ 和 $T_{2\phi-10}$ 分别表示厚10 mm的相变储能材料在 $t_{1\phi-10}$ 、 $t_{2\phi-10}$ 时刻所对应的温度。

表2 15 mm相变储能材料降温曲线特征值
Table 2 Characteristic value of cooling curve of 15 mm PCM

材料种类	厚度/mm	$t_{1\phi-15}$ /min	$t_{2\phi-15}$ /min	$\Delta t_{\phi-15}$ /min	$T_{1\phi-15}/^{\circ}\text{C}$	$T_{2\phi-15}/^{\circ}\text{C}$
泡沫铁	15	0	78	78	59.0	43.0
纯石蜡	15	0	102	102	59.0	43.0

注： $t_{1\phi-15}$ 、 $t_{2\phi-15}$ 、 $\Delta t_{\phi-15}$ 分别表示厚15 mm的相变储能材料开始、结束相变的时间及相变持续时间， $T_{1\phi-15}$ 和 $T_{2\phi-15}$ 分别表示厚15 mm的相变储能材料在 $t_{1\phi-15}$ 、 $t_{2\phi-15}$ 时刻所对应的温度。

24 min，即分别比对照组缩短了1/3和1/4。如上所述，金属铁良好的导热能力是储热用时减少的主要原因。

图6给出了放热过程中厚度为10 mm及15 mm的复合相变储能材料及其对照组的中心层降温曲线，比较同一时间4种材料的温度，10 mm复合相变储能材料<15 mm复合相变储能材料<10 mm对照组<15 mm对照组。两种厚度的复合相变储能材料降温均快于对照组，并且10 mm的储能材料降温速率较15 mm的储能材料更快。这也表明，泡沫铁能缩短石蜡相变放热的时间，并且储能材料越厚，内部热传导所需时间越长，使得整体降温时间增长。

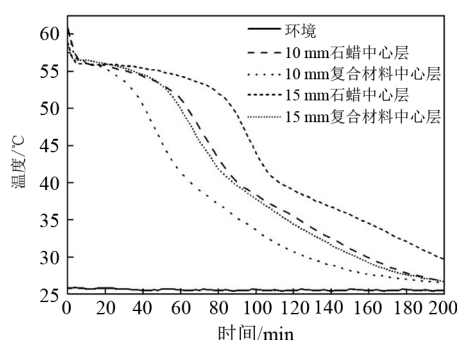


图6 10 mm及15 mm相变储能材料内部温度变化规律比较
Fig.6 Comparison of temperature in 10 mm and 15 mm PCM

2.2 相变放热密度与相变放热速率

复合相变储能材料的相变放热密度由各储热单元的相变放热量除以体积得到。如图7所示, 10 mm和15 mm的复合相变储能材料的放热密度分别为137.66 J/cm³和140.27 J/cm³, 其对照组的放热密度分别为139.90 J/cm³和144.99 J/cm³, 相比对照组, 泡沫铁/石蜡复合相变储能材料的放热密度分别减小了1.60%和3.26%。这是由于放热主要由石蜡完成, 在复合相变储能材料中泡沫铁占有一定体积, 经计算10 mm和15 mm的复合相变储能材料中石蜡的质量分数相比对照组分别减少了1.14%和2.25%。

复合相变储能材料的相变放热速率由各储热单元的相变放热量除以相变时间得到。如图8所示, 10 mm和15 mm的泡沫铁/石蜡复合相变储能材料的放热速率分别为7.01 J/s和7.42 J/s, 是相同厚度对照组的1.44和1.27倍。这表明, 铁作为热的良导体, 能够有效改善复合相变储能材料整体的传热效率, 实现较为高效的放热。同时, 15 mm的泡沫铁/石蜡复合相变储能材料的放热密度和放热速率较10 mm的储能材料略佳, 分别是后者的1.02倍和1.06倍。这是由于泡沫铁的孔隙率直接影响储存石蜡的质量分数, 进而影响到储能材料的放热密度和放热速率, 10 mm和15 mm的泡沫铁/石蜡复合相变储能材料中石蜡的质量分数分别为71.01%和82.37%, 15 mm复合材料中石蜡质量分数更高。就放热密度而言, 石蜡质量分数越高, 放热密度越大; 就放热速率而言, 尽管10 mm的复合材料中泡沫铁含量较高, 能提高整体导热能力, 但其中的石蜡质量分数较小, 整体放热量也较少, 所以总体来说其放热速率较小。

2.3 换热能力与时间和温度的关系

相变储能材料表面的对流换热能力直接决定相变

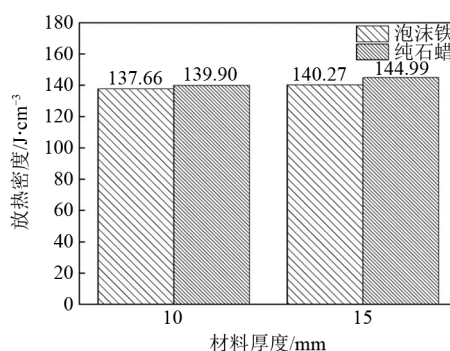


图7 两种厚度泡沫铁/石蜡复合材料与纯石蜡的放热密度
Fig.7 Exothermic density of two thickness iron foam/paraffin composites and pure paraffin

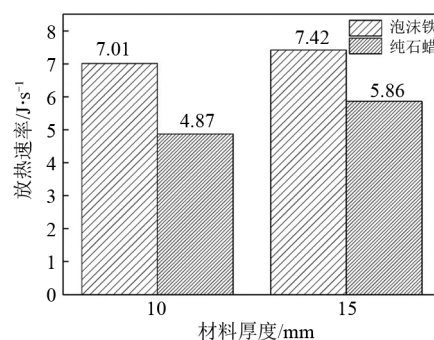


图8 两种厚度泡沫铁/石蜡复合材料与纯石蜡的放热速率
Fig.8 Exothermic rate of two thickness iron foam/paraffin composites and pure paraffin

储能材料的储放热效率, 对流换热系数是衡量表面换热能力的重要参数。根据牛顿冷却定律^[25] [式(1)]:

$$Q = hA\Delta t\Delta\tau \quad (1)$$

式中, Q 为储能材料释放的热量, J; h 为对流换热系数, W/(m²·°C); A 为储能材料的换热面积, m²; Δt 为储能材料的表面与介质的温差, °C; $\Delta\tau$ 为放热时间, s。

根据牛顿冷却定律, 计算出15 mm泡沫铁/石蜡复合相变储能材料的对流换热系数 h , 分别绘制对流换热系数与复合相变储能材料的温度及相变放热时间的关系图, 结果如图9、图10所示。从图9可以看出, 对流换热系数在放热开始阶段较大, 对照图5可知, 开始放热后石蜡很快达到了固-液相变阶段, 在较短时间内放出了大量的热量, 因此对流换热系数较大。随着时间的延长石蜡逐渐凝固, 对流换热系数不断减小, 但在5040 s时达到了一个较小的峰值, 由DSC曲线^[23]可知此时石蜡发生了固-固相变。图10曲线的变化规律与图9相似, 在37.0 °C左右的较小峰值处发生了固-固相变, 55.0 °C左右的较大峰值处为固-液相变^[23]。

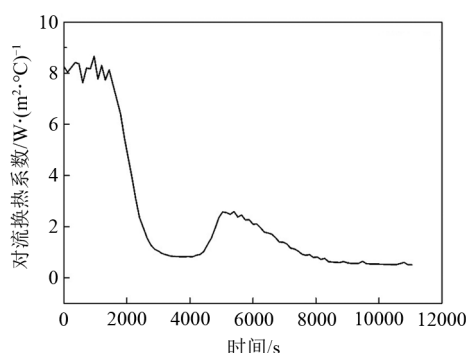


图9 对流换热系数随时间的变化规律

Fig.9 The variation of convective heat transfer coefficient with time

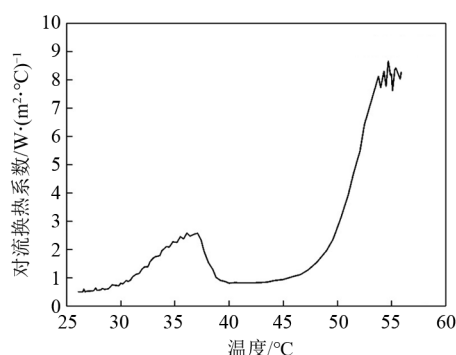


图10 对流换热系数随温度的变化规律

Fig.10 The variation of convective heat transfer coefficient with temperature

为了更好地指导实际过程的应用,对曲线进行了回归处理,分别得到了25.0℃时54号半精炼石蜡从55.9℃降温至26.1℃过程中,复合相变储能材料的对流换热系数 h 与相变放热时间 τ 的关系[式(2)],以及与储能材料温度 T 的关系[式(3)]。所得到的公式 R^2 接近1,说明该公式可以用于预测实际值。

$$h = \begin{cases} (0.12091483 - 0.0024046659\tau - 1.0003268 \times 10^{-7}\tau^2 \ln \tau + 1.3758919 \times 10^{-8}\tau^{2.5} - 0.011162646\tau^{0.5} \ln \tau + 0.035223329\tau \ln \tau)^{-1}, & 0 < \tau \leq 3840 \quad R^2 = 0.99 \\ (97759.509 - 13.852346\tau + 3497.6328(\ln \tau)^2 + 199.60774\tau \ln \tau - 1731.9875\tau^{0.5} - 32515.869 \ln \tau)^{-1}, & 3840 < \tau \leq 11040 \quad R^2 = 0.98 \end{cases} \quad (2)$$

式中, τ 为相变放热时间,s。

$$h = \begin{cases} (838948.66 - 23029.089T^{0.5} - 13605223/T^{0.5} + 16839856 \ln T/T - 97633948 \ln T/T^2 + 2.0795369 \times 10^8/T^2)^{-1}, & 55.9 < T \leq 41 \quad R^2 = 0.99 \\ (-6390237.6 - 35009.552T^{0.5} \ln T + 325841.7T^{0.5} + 26345874 \ln T - 20951477 \ln T/T - 1.0169452 \times 10^8/T^2)^{-1}, & 41 < T \leq 26.1 \quad R^2 = 0.98 \end{cases} \quad (3)$$

式中, T 为储能材料温度,℃。

3 结 论

本文探究了不同厚度泡沫铁对石蜡放热性能的强化效果,结论如下。

(1) 相比对照组,厚10 mm和15 mm的泡沫铁/石蜡复合相变储能材料相变时间分别缩短了1/3和1/4,相变放热密度分别减小了1.60%和3.26%,两者的相变放热速率是相应对照组的1.44和1.27倍。表明添加泡沫铁能缩短相变时间,有效改善石蜡导热系数差的问题。

(2) 本文得出了15 mm泡沫铁/石蜡复合相变储能材料放热过程中,对流换热系数与相变时间及材料温度的关系,可为实际放热过程提供理论指导。

(3) 本研究只对两种厚度的泡沫铁/石蜡复合相变储能材料的放热过程进行了分析,对于其他厚度的材料还有待进一步研究,以完善泡沫金属厚度对石蜡相变过程的影响规律。

参 考 文 献

- [1] 严良,熊伟伟,王小林,等.供需错配下能源替代路径优化[J].资源科学,2019,41(9):1655-1664.
YAN L, XIONG W W, WANG X L, et al. Energy substitution path optimization under supply and demand mismatch[J]. Resources Science, 2019, 41(9): 1655-1664.
- [2] 仓定帮,魏晓平,曹明.我国化石能源消费多因素分析——基于新能源替代与能源技术进步视角[J].数理统计与管理,2020,39(1):1-11.
CANG D B, WEI X P, CAO M. Multi-factors analysis of China's fossil energy consumption-based on new energy substitution and energy technology progress[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2020, 39(1): 1-11.
- [3] 张小筠,刘戒骄.新中国70年环境规制政策变迁与取向观察[J].改革,2019,38(10):16-25.
ZHANG X Y, LIU J J. The evolution and orientation choice of environmental regulation policy in PRC from 1949 to 2019[J]. Reform, 2019, 38(10): 16-25.
- [4] XU B, ZHOU J, NI Z J, et al. Synthesis of novel microencapsulated phase change materials with copper and copper oxide for solar energy storage and photo-thermal conversion[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, 179: 87-94.
- [5] 张新宇,母军,储德森,等.太阳能预干联合热压干燥对桉木单板质量的影响[J].东北林业大学学报,2019,47(2):81-87.
ZHANG X Y, MU J, CHU D M, et al. Effect of Solar Pre-drying combined with hot-pressing on the quality of eucalyptus veneers[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(2): 81-87.
- [6] 张力,胡传坤,高建民,等.太阳能与双热源热泵组合干燥落叶松[J].

- 东北林业大学学报, 2014, 42(12): 141-144.
- ZHANG L, HU C K, GAO J M, et al. Solar energy and dual-source heat pump combined drying system on larch[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(12): 141-144.
- [7] ZHOU Z H, LIU J W, WANG C D, et al. Research on the application of phase-change heat storage in centralized solar hot water system[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198: 1262-1275.
- [8] 何峰, 李廷贤, 姚金煜, 等. 基于相变储热的太阳能多模式采暖系统及应用[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(2): 311-318.
- HE F, LI T X, YAO J Y, et al. Solar multi-mode heating system based on latent heat thermal energy storage and its application[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(2): 311-318.
- [9] TAO Y B, HE Y L. A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 93: 245-259.
- [10] MAZMAN M, CABEZA L F, MEHLING H, et al. Utilization of phase change materials in solar domestic hot water systems[J]. Renewable Energy, 2009, 34(6): 1639-1643.
- [11] AL-HINTI I, AL-GHANDOOR A, MAALY A, et al. Experimental investigation on the use of water-phase change material storage in conventional solar water heating systems[J]. Energy Conversion & Management, 2010, 51(8): 1735-1740.
- [12] SIVASAMY P, DEVARAJU A, HARIKRISHNAN S. Review on heat transfer enhancement of phase change materials (PCMs)[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 56, Part 2: 14423-14431.
- [13] 杨磊, 姚远, 张冬冬, 等. 有机相变储能材料的研究进展[J]. 新能源进展, 2019, 7(5): 1-9.
- YANG L, YAO Y, ZHANG D D, et al. Progress of organic phase change energy storage materials[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2019, 7(5): 1-9.
- [14] 陈颖, 姜庆辉, 辛集武, 等. 相变储能材料及其应用研究进展[J]. 材料工程, 2019, 47(7): 1-10.
- CHEN Y, JIANG Q H, XIN J W, et al. Research status and application of phase change materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(7): 1-10.
- [15] 何正斌, 甘雪菲, 杨洁, 等. 石蜡相变储热管放热时间的理论预测与验证[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 286-290.
- HE Z B, GAN X F, YANG J, et al. Theoretic prediction and verification of heat release time for paraffin phase change heat storage tubes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(12): 286-290.
- [16] ZEINELABDEIN R, OMER S, GAN G. Critical review of latent heat storage systems for free cooling in buildings[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 2843-2868.
- [17] NAZIR H, BATTOOL M, OSORIO F J B, et al. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 129: 491-523.
- [18] 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.
- [19] 刘洋. 基于石蜡-泡沫铜相变复合材料的储能散热器研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2018.
- LIU Y. Investigation on energy storage radiator based on paraffin-copper foam composite phase change material[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2018.
- [20] 徐众, 侯静, 万书权, 等. 金属泡沫/石蜡复合相变材料的制备及热性能研究[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(1): 109-116.
- XU Zhong, HOU Jing, WAN Shuquan, et al. Preparation and thermal properties of metal foam/ paraffin composite phase change materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(1): 109-116.
- [21] 魏高升, 王遥, 杨彦平, 等. 基于孔尺度的泡沫金属强化相变储热材料传热性能数值模拟[J]. 发电技术, 2018, 39(2): 158-164.
- WEI G S, WANG Y, YANG Y P, et al. Pore-scale numerical simulation of heat transfer enhancement of phase change thermal energy storage materials with porous foam metals[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(2): 158-164.
- [22] WANG Z C, ZHANG Z Q, JIA L, et al. Paraffin and paraffin/aluminum foam composite phase change material heat storage experimental study based on thermal management of Li-ion battery[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 78: 428-436.
- [23] 万倩, 肖浩南, 钱京, 等. 泡沫铁对石蜡相变储热过程的影响[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(1): 94-100.
- WAN Qian, XIAO Haonan, QIAN Jing, et al. Influence of iron foam on paraffin phase change heat storage process[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(1): 94-100.
- [24] 张佳利, 丁宇, 曲丽洁, 等. 石蜡/膨胀石墨复合相变储热单元的放热性能[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(1): 116-123.
- ZHANG J L, DING Y, QU L J, et al. Discharge performance of a thermal energy storage unit with paraffin-expanded graphite composite phase change materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(1): 116-123.
- [25] 何正斌, 伊松林. 木材干燥理论[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016: 59-62.
- HE Z B, YI S L. Wood drying theory[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2016: 59-62.