

DOI: 10.7652/xjtuxb202003023

金属泡沫铜/石蜡复合相变材料 融化传热特性的实验研究

田东东¹, 王会¹, 刁永发¹, 周颖²

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 201620, 上海; 2. 上海建科广申建筑设计有限公司, 200000, 上海)

摘要: 为了探究不同厚度的金属泡沫铜对石蜡融化过程的影响,设计搭建了可视化相变蓄热实验台,制备了不同厚度的金属泡沫铜复合相变材料,通过实验对比研究了纯相变材料和添加不同厚度金属泡沫铜的复合相变材料的融化界面变化和内部温度分布,分析了不同厚度的金属泡沫铜对换热强度的影响。实验结果表明:在纯相变材料融化过程中自然对流起主导作用,5 mm厚的金属泡沫铜促进了上部的石蜡自然对流,10、15、20 mm的金属泡沫铜抑制了石蜡的自然对流;金属泡沫铜的厚度越大,导热换热强度越大;对流换热强度和导热换热强度二者呈现出负相关的关系;当金属泡沫铜厚度为14 mm时,导热换热强度和对流换热强度相当。

关键词: 石蜡;金属泡沫;可视化实验;换热强度

中图分类号: TK02 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)03-0188-09

Experimental Study on the Melting Heat Transfer Characteristics of Paraffin/Copper Foam Composite

TIAN Dongdong¹, WANG Hui¹, DIAO Yongfa¹, ZHOU Ying²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Shanghai Jianke Guangshen Architectural Design Co. Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract: To explore the melting behavior of copper foam composite materials, a visualized phase-change thermal storage experimental setup was built. Foamed copper phase change materials with different thickness were prepared. The changes of the melting interface were studied by experiments, and the internal temperature distributions of pure phase-change materials and composite phase-change materials were compared. The effect of metal foam thickness on the heat transfer intensity was analyzed. The experimental results show that natural convection plays a leading role in the melting process of pure phase-change materials. The 5 mm-thick metal foam promotes the natural convection of the upper paraffin, however the metal foam with the thickness of 10, 15 or 20 mm inhibits the natural convection of paraffin. The larger the thickness of copper foam, the greater the heat conduction intensity. There is a negative correlation between the convection heat transfer intensity and conduction heat transfer intensity. When the thickness of the metal foam is 14 mm, the conduction and convection heat transfer intensities are equivalent.

Keywords: paraffin; metal foam; visualized experiment; heat transfer intensity

收稿日期: 2019-09-03。 作者简介: 田东东(1991—),男,硕士生;王会(通信作者),女,讲师。 基金项目: 上海市青年科技英才扬帆计划资助项目(19YF14011700);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2232019D3-25)。

网络出版时间: 2019-12-07

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20191207.1135.002.html>

相变材料石蜡可通过物质相态的变化来储存或放出热量,以其高潜热、无过冷、无毒性、适中的相变温度等优点而被广泛运用在各种低温相变储能领域^[1-2],但石蜡的导热系数较小($0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),严重制约了其在相变蓄能领域的运用。传统的增大相变材料导热系数的方法是在其中加入膨胀石墨^[3-4]、肋片^[5]、纳米颗粒^[6-8]、金属泡沫^[9-12]等导热系数较大的物质,使其整体表观导热系数增大^[13-15]。金属泡沫作为一种新型工程材料,具有密度小、孔隙率高、导热系数高、比表面积大等优点,通过实验将金属泡沫填充到管内,证明了金属泡沫具有强化换热的特点^[16]。

国内外学者做了大量金属泡沫和相变材料复合蓄能的实验研究。Diani 等实验研究了在不同相变温度的石蜡中填充不同孔密度的金属泡沫,结果表明金属泡沫的添加能加速相变材料的融化,且当孔隙率固定时,改变孔密度对相变材料融化无影响^[17-18]。Rehman 等实验对比了金属泡沫铜和金属泡沫铜/相变材料(PCM)复合材料对散热片的影响,结果表明在相同时间下金属泡沫铜/PCM 复合材料更有利于散热^[19-21]。Guo 等实验研究了不同倾斜角下纯相变材料和复合相变材料的融化情形,结果显示倾斜角的变化对纯相变材料影响很大,但对复合相变材料几乎没有影响^[22]。梁林等实验研究了以石蜡为相变材料的热管式蓄热装置,结果表明增加载热流体和相变材料的温差以及增大流量都可以提高系统蓄放热功率^[23]。Li 等在微胶囊相变材料中加入金属泡沫,实验证实了金属泡沫的加入能够使得系统内温度更加均匀,内部温度梯度降低^[24]。韦攀等针对环形管中填充金属泡沫的蓄热过程进行了可视化实验,结果显示金属泡沫的添加在缩短相变时间的同时抑制了底部石蜡的融化^[25]。

由上述分析可见,现有的研究大都集中于保持实验装置体积不变而相变材料质量变化的情况,通过对比加金属泡沫前后的融化特性,或仅改变金属泡沫的孔密度来探究相变材料的融化特性,很少涉及金属泡沫厚度对相变材料融化特性以及换热强度的影响。

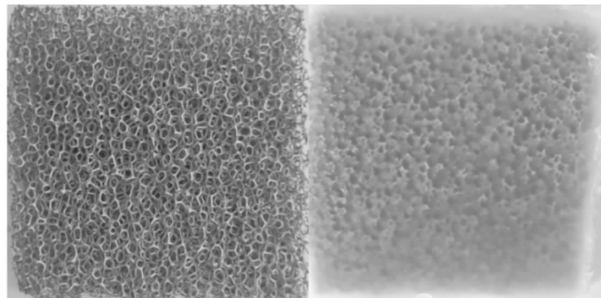
本文采用控制质量法,在相同质量的相变材料中加入不同厚度的金属泡沫,比较不同厚度的金属泡沫铜对相变材料融化特性的影响。本文在融化过程中对相变材料融化界面进行可视化实验,用相机记录相变界面的演化过程,同时在复合相变材料中布置热电偶,实时捕获系统内温度分布。实验结果

可为强化相变材料换热作用机理提供实验基础,为相变材料在工程应用上的优化设计提供有效的实验验证。

1 材料制备及热物性测量

1.1 复合相变材料的制备

采用沉浸法制作复合相变材料,所用材料为金属泡沫铜和石蜡。选用4块金属泡沫铜,孔隙率 ϵ 均为95%,孔密度均为 0.79 mm^{-1} ,当量孔隙直径 d_p 均为 1.27 mm ,长和宽均为 57 mm ,厚度 H 分别为5、10、15、20 mm。相变材料选用切片石蜡(国药集团化学试剂有限公司,熔点范围 $48 \sim 50^\circ\text{C}$),导热系数为 $0.22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。实验前先将金属泡沫铜平置于有机玻璃器皿底部,接着称量60 g石蜡放入有机玻璃器皿中,用曲别针将电加热片平整固定在有机玻璃器皿边壁,然后将玻璃器皿放在水浴锅中加热,水浴锅温度设定高于石蜡相变温度,最终金属泡沫铜会沉浸在石蜡液体中。静置将其冷却到 $28 \sim 29^\circ\text{C}$,以保证每次实验初始条件相同,金属泡沫铜填充石蜡前后的对比照片如图1所示。



(a)填充前 (b)填充后
图1 金属泡沫铜填充石蜡前后对比图

1.2 石蜡的差示扫描量热法(DSC)曲线

为了更好地探究所用相变材料的相变特性,求得相变材料的相变温度区间和相变潜热,对本文实验所用的石蜡做了DSC分析,其DSC曲线如图2

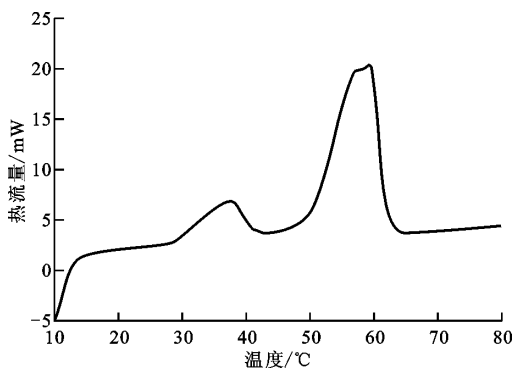


图2 石蜡的DSC相变特性曲线

所示。从图中可以看出,石蜡在融化过程中存在两个相变峰,分别为 37.46 ℃ 和 59.39 ℃,对应的相变过程分别为固-固相变和固-液相变,吸热量分别为 26.599 J · g⁻¹ 和 132.643 J · g⁻¹。固-液相变的起始点为 50.25 ℃,终止点为 61.96 ℃。相变潜热 (159.2 J · g⁻¹) 为固-固相变和固-液相变潜热之和。

2 实验系统与实验方法

为了观察复合相变材料的融化过程,设计了如图 3 所示的实验装置系统。本系统由加热模块、实验段模块及数据采集模块组成。加热模块由直流电源、电加热片、保温箱组成,以为实验提供恒定电功率与保证操作环境稳定,其中电加热片的尺寸为 60 mm × 20 mm × 1 mm。实验段模块由金属泡沫铜/PCM 复合材料、保温材料、高透有机玻璃槽组成,其中高透有机玻璃槽外形尺寸为 70 mm × 70 mm × 30 mm,壁厚为 5 mm。数据采集模块由照相机、安捷伦数据采集仪、计算机、热电偶组成,其中热电偶为 omega T 型,型号为 TT-T-36,线芯直径为 0.127 mm,热电偶测量误差为 0.1 ℃。安捷伦数据采集仪型号为 34972A,测量误差为 0.1 ℃,采集时间间隔为 5 s。

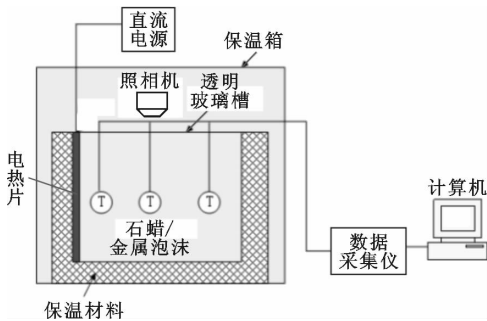


图 3 实验装置示意图

采用扎针法布置热电偶,即将热电偶固定在细针上,热电偶触点深度为 15 mm。当测量纯石蜡融化过程中的温度时,为了减小液态石蜡对热电偶的冲击,还要将探针固定在轻质薄膜板上。本实验共布置了 10 个热电偶,分别位于测点 101~110,其中测点 101~109 用于测量复合相变材料内部温度,测点 110 用于测量保温箱内空气温度,其位置布置如图 4 所示,实物见图 5。

为保证初始条件相同,将装有复合相变材料的有机玻璃器皿放在水浴锅中加热到 28~29 ℃,期间用热电偶测温,当达到温度要求时将玻璃器皿放入保温槽中,接着将其整体放入保温箱内,保温箱温度

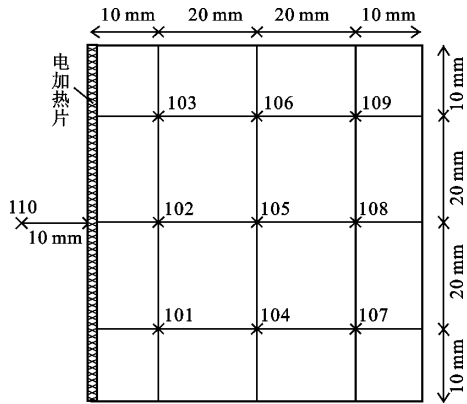


图 4 热电偶布置图



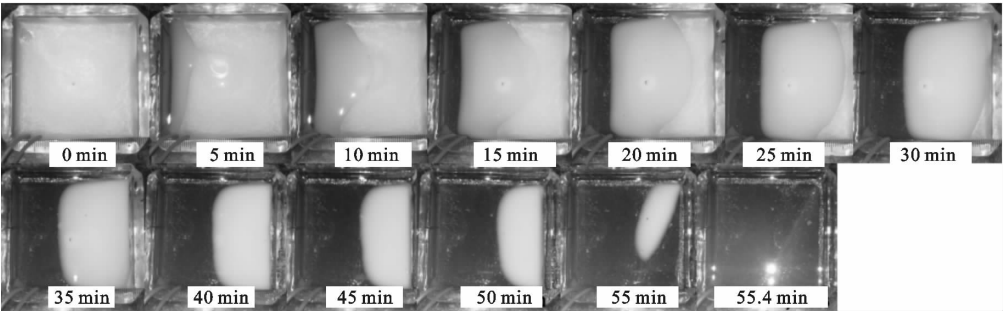
图 5 热电偶实物图

设置为 30 ℃,以排除实验过程中不同操作时间段室温环境的影响。接通直流电源和安捷伦数据采集仪,电源功率保证每次为 10 W,每 5 min 对融化界面进行 1 次拍照。

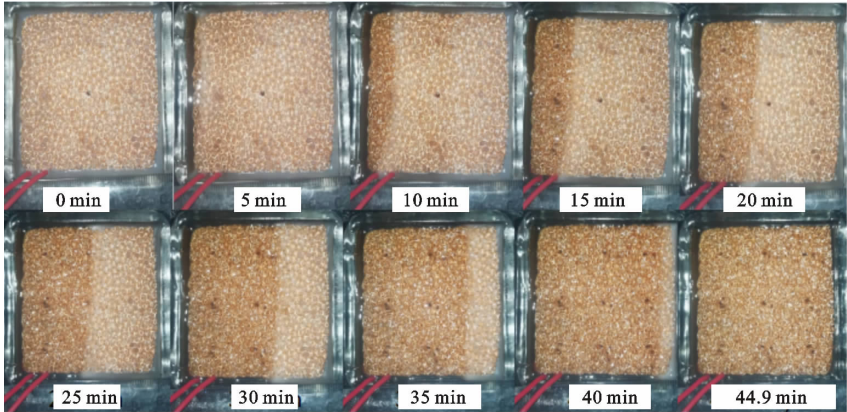
3 实验结果与讨论

3.1 相变界面演化可视化过程

图 6 给出了纯相变材料和金属泡沫铜厚度为 20 mm 的复合相变材料融化过程中相界面演化的俯视图。从图 6a 中可以清晰的看到纯相变材料融化过程中的 3 个区域,即暗色的液相区、灰白色的两相区、乳白色的固相区。纯相变材料在融化过程中,上部融化快,下部融化慢,上部相变界面呈抛物线形状,该融化特点说明在纯相变材料中自然对流传热起主导作用。纯相变材料底部热阻较大,该部分需要强化换热。从图 6b 中只能看到两个相变区,即左侧的液相区、右侧的固相区,没有两相区。固-液相变界面开始时略呈抛物线形,随着融化界面的推进,逐渐变成直线,并保持到融化结束。这说明自然对流在金属泡沫铜厚度为 20 mm 的复合相变材料中被显著抑制,导热在融化过程中起主导作用,且在每一界面处温度较为均匀。



(a)纯石蜡



(b)复合相变材料($H=20\text{ mm}$)

图 6 纯相变材料和复合相变材料融化过程相界面演化图

3.2 金属泡沫铜厚度对相变界面的影响

图 7 给出了相同条件下实验进行到 20 min 时不同金属泡沫铜厚度下的相变界面俯视图。相比纯相变材料,填充有厚度为 5 mm 金属泡沫铜的复合相变材料上面的融化部分进一步增加,原因是金属泡沫铜厚度较薄,上部仍留有一定厚度的纯相变材料,金属泡沫铜的添加使得来自加热片的热量更加快速地往前传递,上部相变材料的对流传热非但没有被抑制,反而进一步加强。随着金属泡沫铜厚度的逐渐增大,上部抛物线形的相变界面逐渐向直线趋势发展,说明自然对流在不断地受到抑制。同时,对于复合相变材料而言,观察液相区和两相区分界面,可以看出随着金属泡沫铜厚度的增大,液相区不断往前推进,两相区不断减小直至消失,说明随着金属泡沫铜厚度的增大,导热作用逐渐增强,最终起到

主导作用。综上可知:对于纯相变材料,自然对流在整个传热过程中起主导作用;对于复合相变材料,当金属泡沫铜厚度为 5 mm 时,上部纯相变材料的自然对流作用进一步增强,但随着金属泡沫铜厚度的增大,自然对流作用逐渐减弱,导热不断加强,最终起主导作用。

3.3 内部测点温度及相变阶段分析

图 8 给出了纯相变材料所有内部测点温度随时间的变化。从图中可以看出,对于纯相变材料,距离加热片最近的测点 101~103 最先开始温度响应,距离加热片最远的测点 107~109 在 1 ks 之后温度才发生变化,热量不能快速往后方传递,在相同时刻,距离加热片近的测点温度高,距离加热片远的测点温度低,温度堆积现象严重^[25]。在融化结束时刻不同测点温度出现了堆叠,是因为当 9 个测点处的石

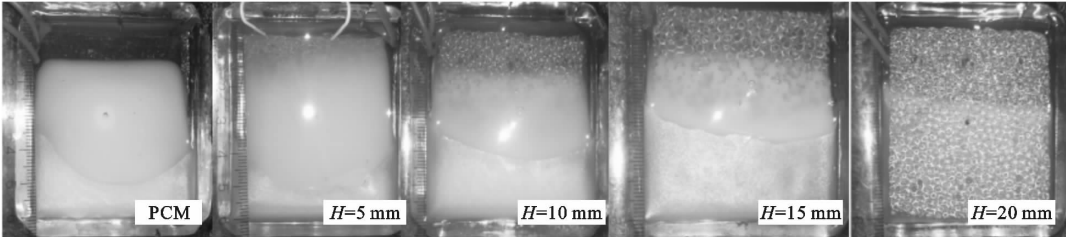


图 7 $t=20\text{ min}$ 时不同金属泡沫铜厚度下相变界面比较

蜡完全融化时玻璃器皿中依旧有未融化的石蜡,需要进一步加热融化,导致已经融化部分的液态石蜡温度趋于一致。从图8中还可以看出,在融化阶段,即使在同一列测点之间也存在较大温差,测点105的温度高于测点104和106。这同样是因为融化界面类似抛物线,中间部位的相变材料先融化,两侧的相变材料后融化,中间的液态石蜡温度高于两侧的固态石蜡温度,这点从图6a中的纯相变材料融化界面也得到了验证。

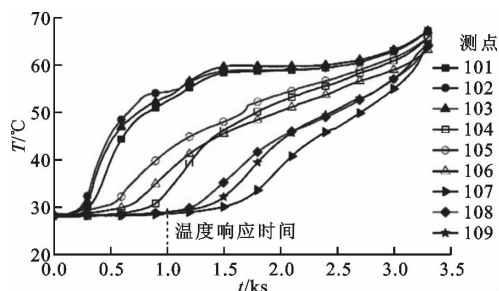


图8 纯相变材料融化过程测中点温度随时间的变化

图9为纯相变材料测点101~103的相变阶段图。从图中可以看出测点101~103历经了3个明显的相变蓄热阶段:第1阶段为固态被加热阶段,对应图中的0~780 s,该阶段相变材料温度迅速上升,直至达到固-液相变点温度,此阶段热量以显热的形式被储存;第2阶段为固-液相变阶段,对应图中的780~2 730 s,此阶段相变材料由固态变成液态,温度上升缓慢,该阶段热量以潜热的形式被储存,相变温度区间落在50~62 °C之间,和DSC分析曲线结果吻合;第3阶段为液态石蜡被进一步加热,从2 730 s到加热结束,温度进一步升高。

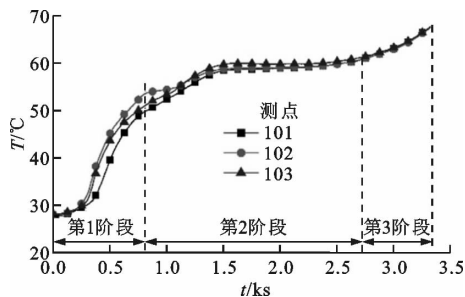


图9 纯相变材料不同相变阶段示意图

图10给出了金属泡沫铜厚度为20 mm的复合相变材料内部所有测点温度随时间的变化。从图中可以看出,复合相变材料并未出现如纯相变材料一样明显的3个相变阶段,温度近似呈线性上升,不同测点温度上升较为一致。距离加热片最近的测点101~103最先出现温度响应,距离加热片最近的测点107~109在220 s时出现温度响应,远远早于纯

相变材料的1 ks,温度堆积现象明显减弱。同时注意到,在同一列不同测点的温度近乎重合,说明复合相变材料内部温度分布较为均匀,这点从图6b中的复合相变材料融化界面也得到了验证。

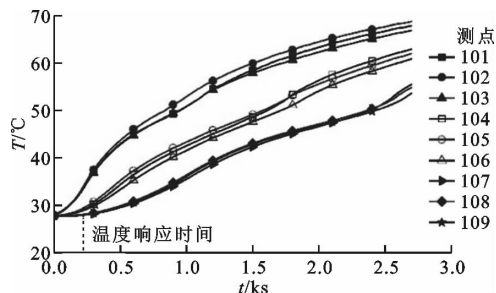
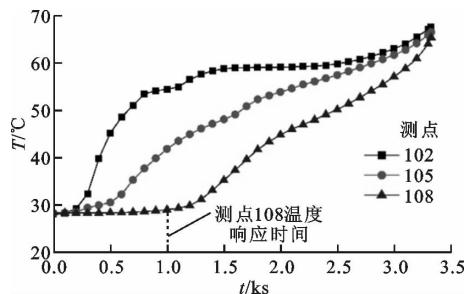


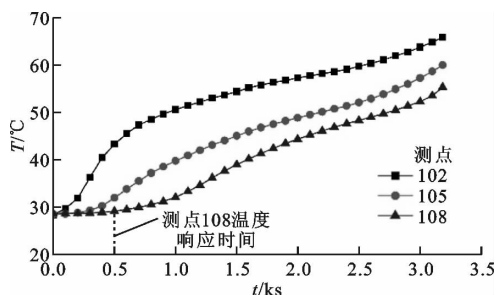
图10 $H=20$ mm的复合相变材料融化过程中测点温度随时间的变化

3.4 金属泡沫铜厚度对中间测点温度的影响

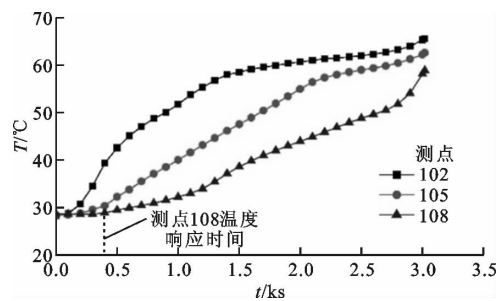
图11给出了纯相变材料和不同厚度复合相变材料相变过程中测点102、105、108的温度随时间的变化。从图中可看出:复合相变材料测点108对温度的响应时间相比纯相变材料提前;对于金属泡沫铜厚度分别为5、10、15、20 mm的复合相变材料,响应时间分别为500、400、300、220 s,均小于纯相变材料的1 ks,并且响应时间随金属泡沫铜厚度增大而依次减小。测点108产生温度响应是总换热方式的综合效果,当添加厚度为5 mm的金属泡沫铜时,总换热强度增加1倍,但当金属泡沫铜的厚度增加1倍时,总换热强度并没有成倍增加。下面分析金属泡沫铜厚度对总换热强度的影响。



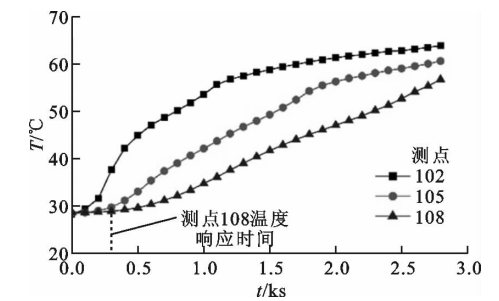
(a) $H=0$ mm



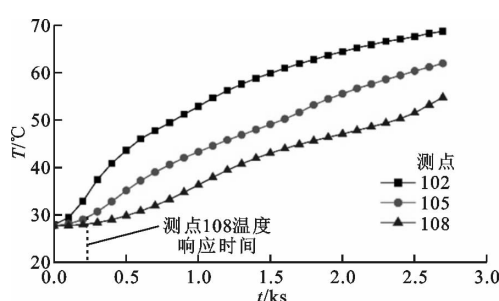
(b) $H=5$ mm



(c) $H=10\text{ mm}$



(d) $H=15\text{ mm}$



(e) $H=20\text{ mm}$

图 11 不同金属泡沫铜厚度复合相变材料中间测点温度随时间的变化

3.5 金属泡沫铜厚度对换热强度的影响

对于框架状复合相变材料,忽略固态和液态相变材料导热系数的变化,有效导热系数计算公式^[26]如下

$$k_{\text{eff}} = \left[k_{\text{pcm}} + \pi \left(\sqrt{\frac{1-\epsilon}{3\pi}} - \frac{1-\epsilon}{3\pi} \right) (k_s - k_{\text{pcm}}) \right] \left[k_{\text{pcm}} + \frac{1-\epsilon}{3} (k_s - k_{\text{pcm}}) \right] / \left[k_{\text{pcm}} + \left(\frac{4}{3} \sqrt{\frac{1-\epsilon}{3\pi}} (1-\epsilon) + \pi \sqrt{\frac{1-\epsilon}{3\pi}} - (1-\epsilon) \right) (k_s - k_{\text{pcm}}) \right] \quad (1)$$

式中: $k_{\text{pcm}}=0.22\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 为 PCM 的导热系数; $k_s=398\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 为铜的导热系数; ϵ 为金属泡沫铜的孔隙率,取 $\epsilon=0.95$ 。把数据代入式(1),算得当金属泡沫孔隙中充盈相变材料时复合相变材料的有效导热系数为 $7.91\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,远大于纯相变材料的导热系数 $0.22\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

结合上文相变界面演化图以及温度测量数据可知,在纯相变材料部分换热方式以自然对流为主,在相变材料和金属泡沫铜组合部分,换热方式以导热为主,上下部分换热方式如图 12 所示。

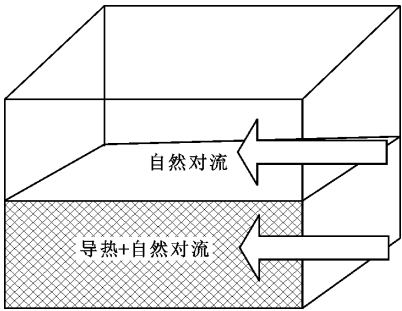


图 12 相变材料不同部位换热方式示意图

测点 108 产生温度响应是总换热强度的综合效果。为分析金属泡沫铜厚度对复合相变材料总换热强度的影响,以测点 108 的响应时间为基准,做如下假设:

- (1)忽略纯相变材料部分的导热作用,只考虑纯相变材料的对流作用,忽略相变材料和金属泡沫铜组合部分的自然对流作用,只考虑相变材料和金属泡沫铜组合部分的导热作用;
- (2)随着金属泡沫铜厚度的增大,导热强度成倍增加。将 5 mm 厚的金属泡沫铜的导热强度记为 A ,则 10 mm 厚的金属泡沫铜的导热强度为 $2A$,15 mm 的为 $3A$,20 mm 的为 $4A$ 。

根据纯相变材料所占有的厚度,将每 5 mm 的纯相变材料的对流换热强度记为 B ,同时注意对流换热强度随着金属泡沫铜厚度的变化而不同,则厚度为 5、10、15 mm 的金属泡沫铜的对流换热强度依次记为 $3B_1$ 、 $2B_2$ 、 B_3 。不同金属泡沫铜厚度下测点 108 的响应时间和综合换热方式如图 13 所示。结合假设条件和综合换热方式示意图,可得不同实验下的综合换热强度,如表 1 所示。

从表 1 中可以清楚地看出,导热换热强度占总换热强度的比例随着金属泡沫铜厚度的增大依次增大,且随着金属泡沫铜厚度的增大,增加幅度越来越大。对流换热强度占总换热强度的比例随着金属泡沫铜厚度的增大依次减小,且随着金属泡沫铜厚度的增大减小幅度越来越大。对流换热强度和导热换热强度二者呈现出负相关的关系,对此可作图找出二者相同时的金属泡沫厚度,也即导热换热强度等于对流换热强度时金属泡沫铜的厚度,如图 14 所示。从图中可以看出,当金属泡沫铜厚度为 14 mm

表 1 不同厚度金属泡沫铜复合相变材料的换热强度

H/mm	5	10	15	20
总换热强度	$A+3B_1=500$	$2A+2B_2=400$	$3A+B_3=300$	$4A=220$
每 5 mm 换热强度	$B_1=148.3$	$B_2=145$	$B_3=135$	$A=55$
对流换热强度与总换热强度之比 $D/\%$	$\frac{3B_1}{A+3B_1}=88.98$	$\frac{2B_2}{2A+2B_2}=72.5$	$\frac{B_3}{3A+B_3}=45$	0
导热换热强度与总换热强度之比 $C/\%$	$\frac{A}{A+3B_1}=11.02$	$\frac{2A}{2A+2B_2}=27.5$	$\frac{3A}{3A+B_3}=55$	100
每 5 mm 对流换热强度衰减幅度 $\%$	$\frac{B_1-B_1}{B_1}=0$	$\frac{B_1-B_2}{B_1}=2.23$	$\frac{B_1-B_3}{B_1}=8.97$	

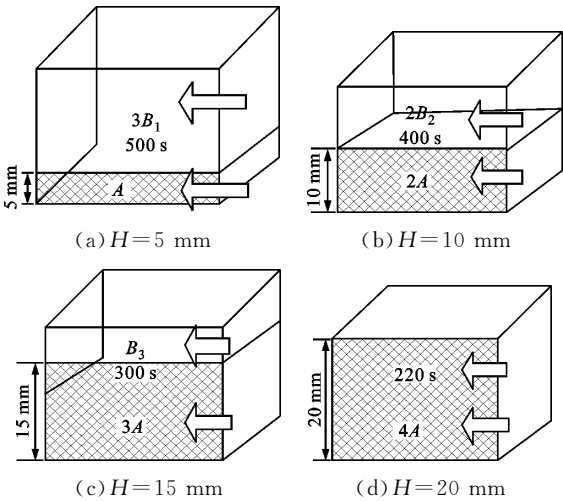


图 13 不同金属泡沫铜厚度下测点 108 的响应时间和综合换热方式示意图

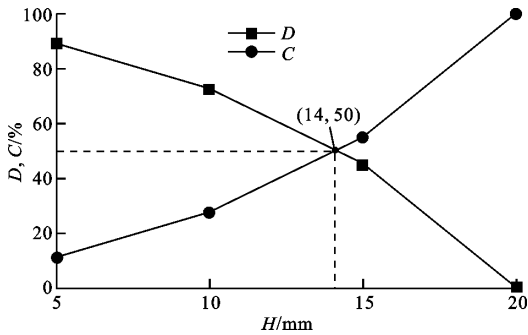


图 14 对流换热强度和导热换热强度变化图

时,导热换热强度和对流换热强度相等。从表 1 中还可以看出,每 5 mm 对流换热强度衰减幅度随着金属泡沫铜厚度的增大而增大,这点从图 7 中的融化界面俯视图也得到了验证。

4 结 论

本文设计搭建了可视化相变蓄热实验台,制备了不同厚度的金属泡沫铜复合相变材料,通过实验研究了不同厚度的金属泡沫铜对相变材料石蜡的融

化过程的影响,分析了融化界面的变化规律,讨论了系统内的温度分布以及金属泡沫铜厚度对换热强度的影响,得到如下结论。

(1)通过设计搭建的融化界面可视化实验平台可清晰观察到融化过程中相变界面的变化,对于纯相变材料可以明显看到其融化过程中的 3 个相变分区,即液相区、两相区、固相区。

(2)对于纯相变材料,自然对流在热量传递过程中起主要作用,相变材料下部热阻较大,融化缓慢,需要强化换热。

(3)添加金属泡沫铜以后,5 mm 的金属泡沫铜非但没有抑制相变材料的自然对流,反而促进了其自然对流,而 10、15、20 mm 的金属泡沫铜抑制了相变材料的自然对流,但导热也随之增强,金属泡沫铜的厚度越大,导热换热强度越大。

(4)对流换热强度和导热换热强度二者呈现出负相关的关系,当金属泡沫铜厚度为 14 mm 时,导热换热强度和对流换热强度相当。

参考文献:

[1] 张寅平,胡汉平,孔祥东.相变储能理论与应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1996:24-25.

[2] HUANG X, ALVA G, JIA Y T, et al. Morphological characterization and applications of phase change materials in thermal energy storage: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 72: 128-145.

[3] 张鹏,肖鑫,王如竹,等.壳管式潜热蓄能系统换热特性[J].化工学报,2012,63(S2):14-20.

ZHANG Peng, XIAO Xin, WANG Ruzhu, et al. Heat transfer characteristics of shell-tube latent thermal energy storage system[J]. CIESC Journal, 2012, 63(S2): 14-20.

[4] 王建,郭航,叶芳,等.相变材料对车用动力电池组内温度分布影响数值模拟[J].化工学报,2018,69

- (4): 1611-1615.
- WANG Jian, GUO Hang, YE Fang, et al. Numerical simulation of the effect of phase change materials on temperature distribution in vehicle power battery packs [J]. CIESC Journal, 2018, 69(4): 1611-1615.
- [5] 马朝, 何雅玲, 袁帆, 等. 高温套管式熔融盐相变蓄热器蓄热性能实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(5): 1-8.
- MA Chao, HE Yaling, YUAN Fan, et al. Experimental study on thermal storage performance of high temperature casing molten salt phase change accumulator [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(5): 1-8.
- [6] 李静, 廖强. 新型纳米复合材料 Cu/SiO₂ 的热特性及相变特性的分子动力学研究 [J]. 中国科学院大学学报, 2018, 35(2): 248-253.
- LI Jing, LIAO Qiang. Molecular dynamics study on thermal properties and phase transition properties of novel nanocomposites Cu/SiO₂ [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2018, 35(2): 248-253.
- [7] 赵亮, 邢玉明, 吕倩, 等. 纳米复合相变材料熔化过程数值模拟 [J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(9): 77-85.
- ZHAO Liang, XING Yuming, LÜ Qian, et al. Numerical simulation of melting process of nanocomposite phase change materials [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(9): 77-85.
- [8] DHAIKAN N S, KHODADADI J M, AL-HATTAB T A, et al. Experimental and numerical investigation of melting of Ne PCM inside an annular container under a constant heat flux including the effect of eccentricity [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 67: 455-468.
- [9] YAO Y, WU H, LIU Z, et al. Pore-scale visualization and measurement of paraffin melting in high porosity open-cell copper foam [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 123: 73-85.
- [10] MAHDI J M, NSOFOR E C. Multiple-segment metal foam application in the shell-and-tube PCM thermal energy storage system [J]. Journal of Energy Storage, 2018, 20: 529-541.
- [11] LAFDI K, MESALHY O, SHAIKH S. Experimental study on the influence of foam porosity and pore size on the melting of phase change materials [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102(8): 083549.
- [12] MANCIN S, DIANI A, DORETTI L, et al. Experimental analysis of phase change phenomenon of paraffin waxes embedded in copper foams [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015, 90: 79-89.
- [13] TAO Y B, LIN C H, HE Y L. Effect of surface active agent on thermal properties of carbonate salt/carbon nanomaterial composite phase change material [J]. Applied Energy, 2015, 156: 478-489.
- [14] AL-ABIDI A A, MAT S, SOPIAN K, et al. Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 53(1): 147-156.
- [15] YANG X H, FENG S S, ZHANG Q L, 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.
- [16] 王会, 郭烈锦. 非平衡条件下金属泡沫管内的流动与传热分析 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36(12): 2699-2702.
- WANG Hui, GUO Liejin. Analysis of flow and heat transfer in metal foam tube under non-equilibrium conditions [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(12): 2699-2702.
- [17] DIANI A, CAMPANALE M. Transient melting of paraffin waxes embedded in aluminum foams: experimental results and modeling [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 14: 119-128.
- [18] MANCIN S, DIANI A, DORETTI L, et al. Experimental analysis of phase change phenomenon of paraffin waxes embedded in copper foams [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015, 90: 79-89.
- [19] REHMAN T U, ALI H M, SAEED A, et al. Copper foam/PCMs based heat sinks: an experimental study for electronic cooling systems [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127: 381-393.
- [20] REHMAN T U, 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.
- [21] REHMAN T U, ALI H M. Experimental investigation on paraffin wax integrated with copper foam based heat sinks for electronic components thermal cooling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 98, 155-162.
- [22] GUO Z X, BAI Q S, HOU J L, et al. Experimental investigation on the melting behavior of phase change

- materials in open-cell metal foams in an inclined rectangular enclosure [J]. *Energy Procedia*, 2018, 152: 215-220.
- [23] 梁林, 刁彦华, 康亚盟, 等. 平板微热管阵列泡沫铜复合结构相变蓄热装置蓄放热特性 [J]. *化工学报*, 2018, 69: 34-42.
- LIANG Lin, DIAO Yanhua, KANG Yameng, et al. Thermal storage and release characteristics of flat-plate micro-heat pipe array-foam copper composite structure phase change thermal storage device [J]. *CIESC Journal*, 2018, 69: 34-42.
- [24] LI W Q, WAN H, JING T T, et al. Microencapsulated phase change material (MEPCM) saturated in metal foam as an efficient hybrid PCM for passive thermal management: a numerical and experimental study [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 146: 413-421.
- [25] 韦攀, 喻家帮, 郭增旭, 等. 环形管填充金属泡沫强化相变蓄热可视化实验 [J]. *化工学报*, 2019, 70(3): 850-856.
- WEI Pan, YU Jiabang, GUO Zengxu, et al. Visualization experiment of phase change heat storage enhanced by annular tube filled with metal foam [J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(3): 850-856.
- [26] MESALHY O, LAFDI K, ELGAFY A, et al. Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (PCM) storage using high thermal conductivity porous matrix [J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46(6): 847-867.

(编辑 荆树蓉)

(上接第 40 页)

- ZHENG Hanyong, PU Jianjie, WANG Shufeng, et al. A study on submerged penetration of gaseous hydrogen chloride into ammonia water [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1995, 3(6): 70-77.
- [9] 郑邯勇, 卜建杰. 六氟化硫在熔融锂中的浸没喷射反应过程 [J]. *化工学报*, 1996, 12(6): 656-662.
- ZHENG Hanyong, PU Jianjie. Submerged reaction jet of SF₆ injected into molten Li [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 1996, 12(6): 656-662.
- [10] CHAN S H. LiSF₆ combustion in stored chemical energy propulsion systems: AD-A224846 [R]. Arlington, USA: Office of Naval Research, 1990.
- [11] CHEN L D, FAETH G M. Structure of turbulent reacting jets submerged in liquid metals [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1983(31): 277-296.
- [12] 李侃侃, 程惠尔, 臧家亮. 用均质流模型研究 SF₆/Li 燃烧体系 [J]. *上海交通大学学报*, 1999, 33(8): 1017-1022.
- LI Kankan, CHENG Huier, ZANG Jialiang. Study on SF₆/Li combustion system using the model of homogeneous flow [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 1999, 33(8): 1017-1022.
- [13] ZHANG H Q, ZHOU L X, CHAN C K. A double- $k-\epsilon$ and multi- δ pdf model for turbulent gas-liquid reacting flows [J]. *Fuel*, 2002(81): 817-827.
- [14] 张会强, 林文漪, 周力行. 水汽浸没凝射流两相流动的数值研究 [J]. *燃烧科学与技术*, 1996, 2(3): 228-235.
- ZHANG Huiqiang, LIN Wenyi, ZHOU Lixing. Numerical simulation of the steam jet submerged in cool water with condensation [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 1996, 2(3): 228-235.
- [15] GULAWANI S S, DAHIKAR S K, JOSHI J B, et al. CFD simulation of flow pattern and plume dimensions in submerged condensation and reactive gas jets into a liquid bath [J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(9): 2420-2435.
- [16] DAHIKAR S K, GULAWANI S S, JOSHI J B, et al. Effect of nozzle diameter and its orientation on the flow pattern and plume dimensions in gas-liquid jet reactors [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(24): 7471-7483.
- [17] DAHIKAR S K, JOSHI J B, SHAH M S, et al. Experimental and computational fluid dynamic study of reacting gas jet in liquid: flow pattern and heat transfer [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(2): 827-849.
- [18] WU X Z, YAN J J, LI W J, et al. Experimental study on sonic steam jet condensation in quiescent subcooled water [J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64(23): 5002-5012.
- [19] LEE W H. A pressure iteration scheme for two-phase flow modeling [C]// *Multiphase Transport Fundamentals, Reactor Safety, Applications*. Washington DC, USA: Hemisphere Publishing, 1980: 407-431.

(编辑 荆树蓉)