

金属泡沫孔密度对石蜡融化性能影响的实验研究

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: 为了探究金属泡沫孔密度对石蜡融化性能的影响,设计搭建了相变蓄热实验台,制作了不同孔密度的复合相变材料。通过实验对比研究了镍复合相变材料和铜复合相变材料内部温度分布,分析了孔密度对导热和对流换热强度的影响,比较了在相同时间内镍复合相变材料和铜复合相变材料的蓄热量。实验结果表明:镍复合相变材料随着孔密度的增大,温度堆积现象加重;当孔密度为 1.02 mm^{-1} 时,镍复合相变材料的对流和导热换热强度相等;当孔密度为 1.26 mm^{-1} 时,铜复合相变材料的对流和导热换热强度相等;当孔密度为 2.36 mm^{-1} 时,铜复合相变材料对应的蓄热量最多;当孔密度为 0.79 mm^{-1} 时,镍复合相变材料对应的蓄热量最多。

关键词: 石蜡;金属泡沫;复合相变材料;孔密度;蓄热量

中图分类号: TK02 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202005005 **文章编号:** 0253-987X(2020)05-0032-08



OSID 码

Experimental Investigation on the Melting Behavior of Paraffin Wax Embedded in Metal Foams with Different Pore Densities

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 paraffin wax in metal foam composite phase-change materials with different pore densities, a phase-change thermal storage experimental setup was designed and composite phase-change materials with different pore densities were prepared. The internal temperature distributions of the copper composite phase-change material and the nickel composite phase-change material were studied. The heat storage capacities of the copper composite phase-change material and the nickel composite phase-change material were compared. Experimental results showed that the temperature accumulation of the nickel composite phase-change material increases with the increase of pore density. For the nickel composite phase-change material, the heat transfer intensities of heat conduction and convection are equivalent when the pore density is 1.02 mm^{-1} , while for the copper composite phase-change material, it is 1.26 mm^{-1} . The copper composite phase-change material with the pore density of 2.36 mm^{-1} has the maximum heat storage, and the nickel composite phase-change material with the pore density of 0.79 mm^{-1} has the maximum heat storage.

Keywords: paraffin wax; metal foam; composite phase-change material; pore density; heat storage

工程实际应用中,很多场合涉及到能量的储存和利用,相变材料石蜡可通过物质相态的变化来实现能量的储存和释放,因其相变潜热高、相变温度范围广、无毒性等优势而被广泛应用,但石蜡的导热系数($0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)普遍较低,严重制约了能量的转换速率,需要通过增强其导热系数来达到强化换热的目的。传统的增加相变材料导热系数的方法是在其中加入膨胀石墨^[1]、肋片^[2]、纳米颗粒^[3-4]、金属泡沫^[5-8]等导热系数较大的物质,使其整体表观导热系数增大^[9-11]。金属泡沫作为一种新型工程材料具有低密度、高孔隙率、大比表面积以及高导热系数等优点,强化换热性能优越,可在满足强化换热的同时使系统质量增加较少^[12]。

金属泡沫孔隙率是孔隙体积与总体积的比值,通常金属泡沫的孔隙率高于80%,常见的孔密度从5 PPI(0.2 mm^{-1})到100 PPI(3.94 mm^{-1})不等^[13]。关于孔隙率和孔密度对相变材料蓄能的影响,国内外学者已进行了大量研究。Xiao等通过真空注入法测量了铜和镍金属泡沫对石蜡导热系数的影响,实验证实了铜和镍金属泡沫的加入都能显著地增加相变材料的导热系数,且孔隙率越小,有效导热系数越大,但当孔隙率固定时,改变孔密度对有效导热系数没有影响^[14]。Zhao等设计实验研究了金属泡沫对相变材料热转化率的影响,实验证实金属泡沫的加入能够使热转化率提高3~10倍,并且小的孔隙率和孔密度更有利于热转化率的提高^[15]。Huang等比较了纯十四醇和泡沫铜复合相变材料的导热系数,发现复合相变材料相比纯十四醇导热系数提高了7.51倍,同时注意到较大孔径的金属泡沫由于表面积的减小而降低了传热速率,复合相变材料的熔点温度略有升高,而凝固温度略有下降^[16]。Jin等比较了3种铜泡沫/石蜡复合相变材料在恒定孔隙率、不同孔密度下的融化性能,发现当壁面过热度为 20°C 时,孔密度为30 PPI(1.18 mm^{-1})和50 PPI(1.97 mm^{-1})的复合相变材料表现出比孔密度为15 PPI(0.59 mm^{-1})的复合相变材料更好的融化速率,当壁面过热度为 30°C 时,孔密度为30 PPI的铜泡沫具有比孔密度为15和50 PPI的铜泡沫更好的融化速率,这是由于通道狭窄对流传热被抑制,而小孔径不适合高融化速率所致^[17]。Tao等采用格子玻尔兹曼法数值研究了孔密度和孔隙率对铜复合相变材料潜热蓄能的影响,结果表明当孔隙率为0.9~0.94时,增加孔密度能够加速相变材料的融化,但是当孔隙率为0.98时,相变材料融化率随着孔密

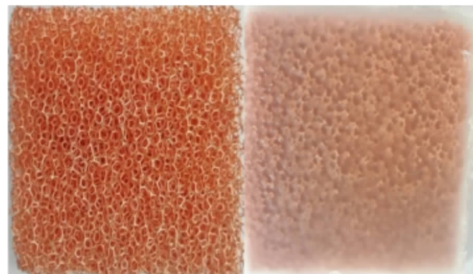
度的增加先增加再减小,因此孔密度为45 PPI(1.78 mm^{-1})、孔隙率为0.94被认为是铜复合相变材料的最佳组合^[18]。Qu等实验研究了孔隙率和孔密度对铜泡沫/相变材料(PCM)复合材料中电子器件温度的影响,结果表明降低铜泡沫的孔隙率和孔密度会导致表面温度和融化时间的降低^[19]。

由上述分析可见,现有的文献大都集中在金属泡沫孔密度和孔隙率对复合相变材料有效导热系数的影响,证明了孔密度、孔隙率的改变能够加快或抑制相变材料的热量转化速率,但很少有涉及孔密度对相变材料内部温度分布、蓄热量及对流和导热换热强度影响的研究。

虽然镍的导热系数较低,但却因高熔点(1455°C)而经常被使用在高温蓄能装置中。本文采用控制质量法,在相同质量的相变材料中加入不同孔密度的镍和铜金属泡沫,比较了不同孔密度下的金属泡沫对相变材料融化特性的影响。本文实验在复合相变材料中布置热电偶,以实时捕获系统内温度分布。

1 复合相变材料的制备

实验采用沉浸法制作复合相变材料,所用材料为镍/铜金属泡沫和石蜡。选用镍和铜金属泡沫各5块,孔隙率 ϵ 均为0.95,两种材料孔密度 P 依次为0.79、1.18、1.57、1.97、2.36 mm^{-1} ,长 $\times$ 宽 $\times$ 高均为 $57 \text{ mm} \times 57 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。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 铜金属泡沫填充石蜡前后对比图

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 2 所示的实验装置系统,该实验系统由加热模块、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,目的是为实验提供恒定电功率与保证操作环境稳定,其中电加热片尺寸为 60 mm×20 mm×1 mm;实验段模块由金属泡沫/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,测量误差为 0.1℃,线芯直径为 0.127 mm。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。

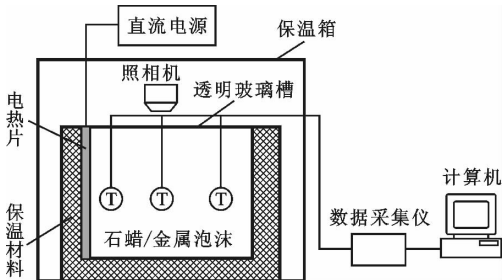
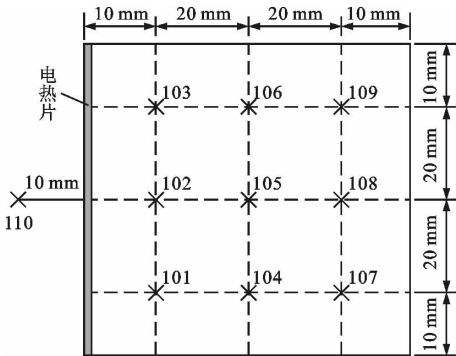


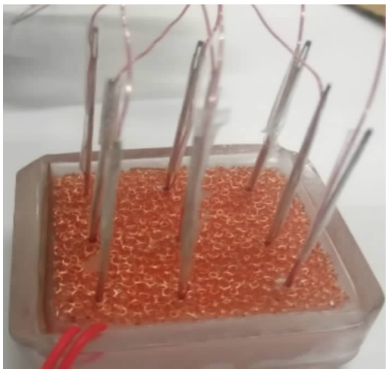
图 2 实验装置示意图

采用扎针法布置热电偶,将热电偶固定在细针上,热电偶触点深度为 15 mm。本实验共布置了 10 个热电偶,分别记为 101~110 测点,其中 101~109 测点测量复合相变材料内部温度,110 测点测量保温箱内空气温度,其位置布置和实物如图 3 所示。

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



(a) 热电偶位置布置



(b) 热电偶实物

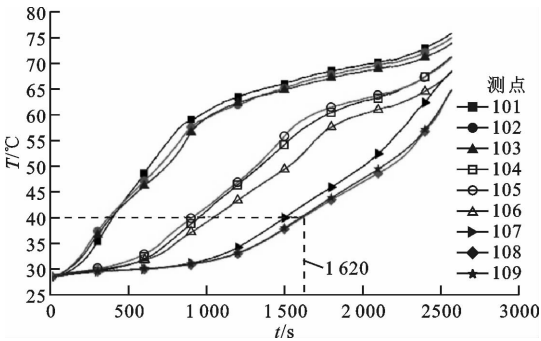
图 3 热电偶位置布置和实物图

仪,调整电源功率,实验中电功率为 12 W。

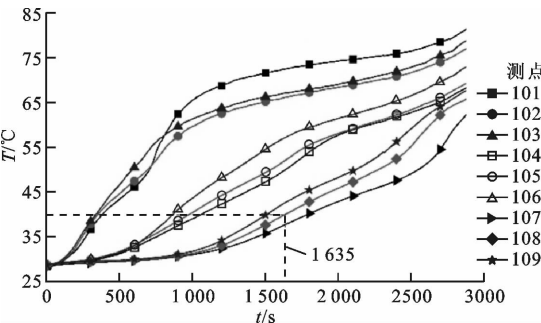
3 实验结果与讨论

3.1 孔密度对温度分布的影响

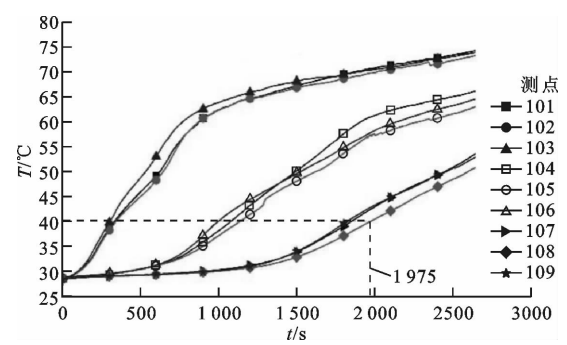
图 4、图 5 分别给出了不同孔密度下镍/铜复合相变材料内部温度随时间的变化。从图中可以看出,当孔密度变化时,复合相变材料内部温度分布不同,说明孔密度影响复合相变材料内的温度分布。定义从开始加热到测点 108 的温度达到 40℃ 这段时间为系统响应时间,响应时间反映系统温度向后传递的能力,响应时间越长,温度堆积现象越严重。由图 4 可知,孔密度为 0.79、1.57、2.36 mm⁻¹ 的镍复合相变材料响应时间分别为 1 620、1 635、1 975



(a) 孔密度为 0.79 mm⁻¹



(b) 孔密度为 1.57 mm⁻¹



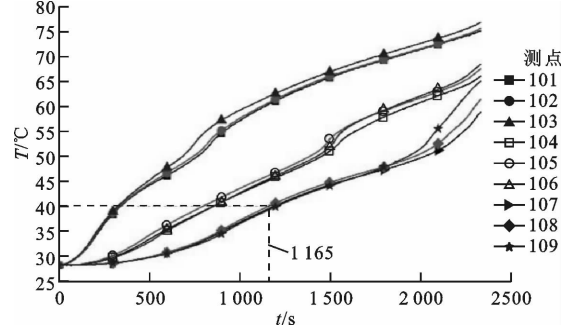
(c)孔密度为 2.36 mm⁻¹

图 4 孔密度对镍复合相变材料温度分布的影响

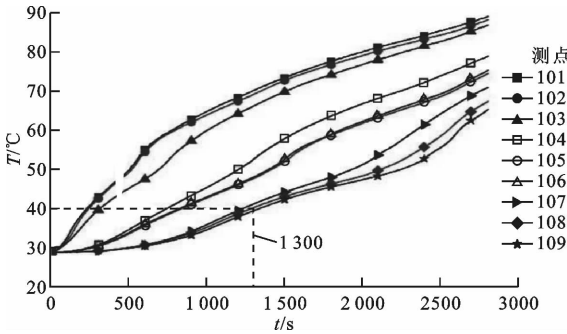
s,随着孔密度增大,响应时间延长,温度堆积现象加重。因为当电功率固定时,随着孔密度的增大,相变材料和金属泡沫骨架接触面积增加,黏性阻力增大,液体流动的通道变得越来越狭窄,浮升力引起的自然对流速度不断减小^[20-21],对流换热被抑制,当对流换热下降的幅度大于导热换热上升的幅度时,总换热强度减小,响应时间增加。由图 5 可知,孔密度为 0.79、1.57、2.36 mm⁻¹的铜复合相变材料响应时间分别为 1 165、1 300、1 220 s,未出现如镍一样响应时间随孔密度增大而增加的情况,同时注意到,铜复合相变材料相比镍复合相变材料响应时间均缩短,最大缩短幅度为 38%。

3.2 孔密度对融化时间的影响

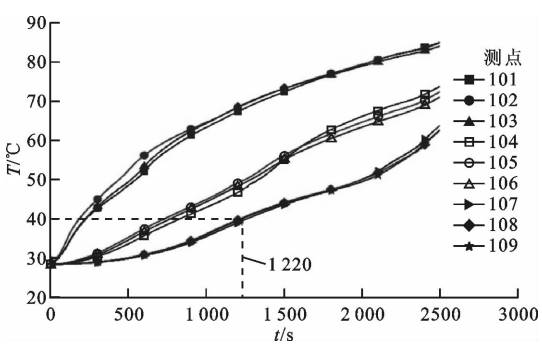
图 6 给出了 3 种孔密度下复合相变材料融化完



(a)孔密度为 0.79 mm⁻¹



(b)孔密度为 1.57 mm⁻¹



(c)孔密度为 2.36 mm⁻¹

图 5 孔密度对铜复合相变材料温度分布的影响

毕所用时间。从图中可以看出,不同孔密度下融化时间不同。对两种材料而言,均是孔密度为 0.79 mm⁻¹的复合相变材料融化完毕用时最短,孔密度为 1.57 mm⁻¹时用时最长,孔密度为 2.36 mm⁻¹时次之。这主要是因为孔密度为 0.79 mm⁻¹的复合相变材料相比另外两者,单位长度内孔的个数较少,孔径较大,对流换热强度相比另外两者增强。孔密度为 2.36 mm⁻¹的复合相变材料单位长度内孔的个数较多,孔径较小,导热换热强度相比另外两者增强。由图 6 还可以看出,在相同孔密度下,铜复合相变材料融化完毕耗时始终低于镍复合相变材料。

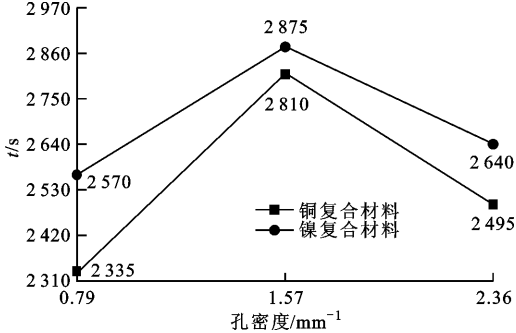


图 6 不同孔密度复合相变材料融化时间比较

3.3 孔密度对换热强度的影响

由 3.2 小节分析可知,不同孔密度下复合相变材料融化时间不同,主要是因为不同孔密度时复合相变材料的换热强度不同,下面分析孔密度对换热强度的影响。

对于板状复合相变材料,有效导热系数计算公式^[22]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_{pcm} 为相变材料的导热系数, 因为在相变过程中导热系数变化不大, 所以忽略液态和固态相变材料导热系数的差异, 取 $0.22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; ϵ 为金属泡沫的孔隙率, 取 $\epsilon = 0.95$; k_s 为金属泡沫导热系数, 铜泡沫取 $398 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 镍泡沫取 $91 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。根据式(1)可得铜复合相变材料有效导热系数为 $7.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 镍复合相变材料有效导热系数为 $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

根据孔密度的定义, 得不同孔密度下金属泡沫当量孔隙直径 d_p 计算公式如下

$$d_p = \frac{25.4}{P} \quad (2)$$

式中 P 为金属泡沫的孔密度。

金属泡沫的比表面积 A_s 计算公式^[23] 如下

$$A_s = 4.867 \frac{1 - 0.971(1 - \epsilon)^{0.5}}{d_p(1 - \epsilon)^{0.5}} (1 - \epsilon) \quad (3)$$

结合式(2)和(3)可知, 孔密度与比表面积成正比, 即孔密度为 1.57 mm^{-1} 的金属泡沫的比表面积是孔密度为 0.79 mm^{-1} 的金属泡沫比表面积的 2 倍。根据傅里叶定律, 热流量和换热面积成正比, 导热换热强度与比表面积成正比, 记孔密度为 0.79 mm^{-1} 的镍复合相变材料导热换热强度为 A_1 , 则孔密度为 1.57 mm^{-1} 的镍复合相变材料导热换热强度为 $2A_1$ 。

为研究孔密度对换热强度的影响, 对于金属泡沫孔密度为 2.36 mm^{-1} 的复合相变材料, 因为当量孔隙直径很小, 相比孔密度较小的金属泡沫, 液态相变材料内部流动受到的阻力很大, 故忽略内部的对流作用, 认为只有导热作用, 而对于孔密度小于 2.36 mm^{-1} 的金属泡沫, 内部换热既有导热又有对流。

108 测点的温度达到 40°C 时是综合换热效果, 以此时间为基准, 分析不同孔密度下对流和导热换热强度。记孔密度为 0.79 mm^{-1} 的铜复合相变材料的导热换热强度为 A_2 , 则孔密度为 1.57 mm^{-1} 的铜复合相变材料的导热换热强度为 $2A_2$ 。用 B_x 表示镍复合相变材料对流换热强度, 用 B'_x 表示铜复合相变材料对流换热强度, 下标 x 代表孔密度, 分别为 $0.79, 1.18, 1.57, 1.97, 2.36 \text{ mm}^{-1}$ 。

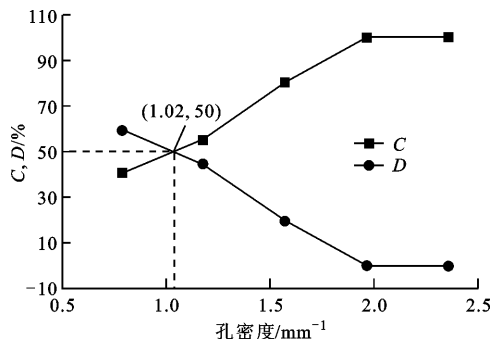
表 1 和表 2 分别列出了镍/铜复合相变材料在不同孔密度下的换热强度。从表 1 中可清晰地看出, 对于镍复合相变材料, 导热换热强度随着孔密度的增大逐渐增大, 且增加的幅度越来越大, 对流换热强度随着孔密度的增大逐渐减小, 且减小的幅度越来越大。同时注意到, 当孔密度为 1.97 mm^{-1} 时,

对流换热强度出现了负值, 主要是因为假设条件中认为孔密度为 2.36 mm^{-1} 的复合相变材料的对流换热强度为 0, 从数据上可以看出, 当孔密度为 1.97 mm^{-1} 时, 对流换热的作用即可以忽略。对比表 1 和表 2, 发现铜复合相变材料的对流换热强度并未出现负值。瑞利数 Ra 表征多孔介质内流体因温差而产生的浮升力与黏性力之比, 其计算公式^[24] 为

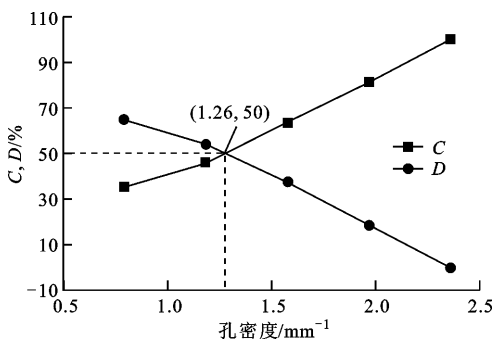
$$Ra = \frac{\beta \Delta T g k L}{a \nu} \quad (4)$$

式中: β 为相变材料膨胀系数; ΔT 为温差; g 为重力加速度; k 为渗透率; L 为特征常数; a 为导温系数; ν 为运动黏度系数。由式(4)知, 当温差增大时, 浮升力增大黏性力减小。因为铜的导热系数较大, 在相同的时间内能够传递更多的热量, 使得复合相变材料的温度更高, 相同条件下铜复合相变材料的对流换热强度大于镍复合相变材料的对流换热强度, 而对于镍复合相变材料, 因为有效导热系数 ($2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 较小, 导致其在相同条件下浮升力小于铜复合相变材料的浮升力, 进而对流换热强度降低。

定义导热换热强度占总换热强度的百分比为 C , 对流换热强度占总换热强度的百分比为 D , 图 7 给出了镍/铜复合相变材料换热强度随孔密度的变化。从图中可以看出: 对于镍复合相变材料, 当孔密度为 1.02 mm^{-1} 时, 对流和导热换热强度相等; 对于



(a) 镍复合相变材料



(b) 铜复合相变材料

图 7 孔密度对镍/铜复合相变材料换热强度的影响

表 1 孔密度对镍复合相变材料换热强度的影响

P/mm^{-1}	0.79	1.18	1.57	1.97	2.36
总换热强度	$A_1+B_{0.79}=1\ 620$	$1.5A_1+B_{1.18}=1\ 795$	$2A_1+B_{1.57}=1\ 635$	$2.5A_1+B_{1.97}=1\ 620$	$3A_1=1\ 975$
导热换热强度	$A_1=658.3$	$1.5A_1=987.4$	$2A_1=1\ 316.6$	$2.5A_1=1\ 645.8$	$3A_1=1\ 975$
对流换热强度	$B_{0.79}=961.7$	$B_{1.18}=807.6$	$B_{1.57}=318.4$	$B_{1.97}=-25.8$	0
$C/\%$	$\frac{A_1}{A_1+B_{0.79}}=40.6$	$\frac{1.5A_1}{1.5A_1+B_{1.18}}=55$	$\frac{2A_1}{2A_1+B_{1.57}}=80.5$	100	100
$D/\%$	$\frac{B_{0.79}}{A_1+B_{0.79}}=59.4$	$\frac{B_{1.18}}{1.5A_1+B_{1.18}}=45$	$\frac{B_{1.57}}{2A_1+B_{1.57}}=19.5$	0	0

表 2 孔密度对铜复合相变材料换热强度的影响

P/mm^{-1}	0.79	1.18	1.57	1.97	2.36
总换热强度	$A_2+B'_{0.79}=1\ 165$	$1.5A_2+B'_{1.18}=1\ 325$	$2A_2+B'_{1.57}=1\ 300$	$2.5A_2+B'_{1.97}=1\ 250$	$3A_2=1\ 975$
导热换热强度	$A_2=406.7$	$1.5A_2=610.1$	$2A_2=813.4$	$2.5A_2=1\ 016$	$3A_2=1\ 975$
对流换热强度	$B'_{0.79}=758.3$	$B'_{1.18}=714.9$	$B'_{1.57}=486.6$	$B'_{1.97}=233.3$	0
$C/\%$	$\frac{A_2}{A_2+B'_{0.79}}=34.9$	$\frac{1.5A_2}{1.5A_2+B'_{1.18}}=46$	$\frac{2A_2}{2A_2+B'_{1.57}}=63.6$	$\frac{2.5A_2}{2.5A_2+B'_{1.97}}=81.3$	100
$D/\%$	$\frac{B'_{0.79}}{A_2+B'_{0.79}}=65.1$	$\frac{B'_{1.18}}{1.5A_2+B'_{1.18}}=54$	$\frac{B'_{1.57}}{2A_2+B'_{1.57}}=37.4$	$\frac{B'_{1.97}}{2.5A_2+B'_{1.97}}=18.7$	0

铜复合相变材料,当孔密度为 1.26 mm^{-1} 时,对流和导热换热强度相等。

3.4 孔密度对蓄热量的影响

3.4.1 复合相变材料蓄热量比较 由图 6 可知,相同孔密度下镍复合相变材料融化完毕所用时间比铜复合相变材料长,以铜复合相变材料融化完毕所用时间为基准,比较在相同时间内不同材料的蓄热量,为此作出以下假设。

(1)在保温箱内,相比导热换热量,忽略融化过程中融化段和保温箱内空气的自然对流散热,以及融化段与保温箱内壁面的热辐射散热^[25]。

(2)相变材料的液态比热容和固态比热容均为常数,记为 $c_l、c_s$ 。

(3)相变材料的相变温度 t_s 保持不变,为固定值。

(4)复合相变材料的初始温度 t_{int} 相等,均为 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

取实验段为系统,根据能量守恒^[26],有

$$q = \Delta u + w \tag{5}$$

式中: q 为加给系统的热量; Δu 为系统的热力学能差; w 为系统对外做的功。

因为该系统没有对外做功,所以 $w=0$ 。相变材料储存的热量等于相变材料的热力学能差,相变材料的热力学能差可由下式计算

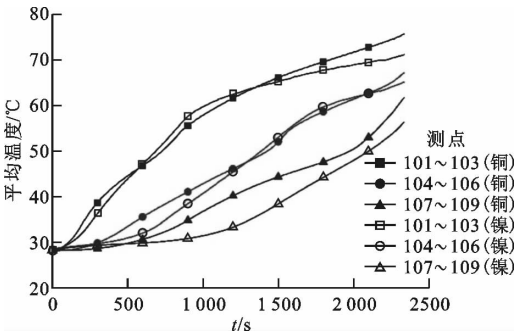
$$\Delta u = c_s(t_s - t_{\text{int}}) + c_l(t - t_s) \tag{6}$$

由式(5)和(6),结合假设条件,可得

$$q = c_s(t_s - t_{\text{int}}) + c_l(t - t_s) \tag{7}$$

由式(7)可知,只需比较相同时刻下对应的测点温度,测点温度高的系统储热多,分别取镍和铜复合相变材料测点 101~103、104~106、107~109 的平均温度进行比较,结果如图 8 所示。从图中可以看出,相同孔密度下,在融化结束时刻,铜复合相变材料的平均温度均高于镍复合相变材料的平均温度。由式(7)知,在相同时间内,铜复合相变材料比镍复合相变材料储存的热量更多。

3.4.2 相同材料蓄热量比较 由上面的分析可知,只需比较相同时间内的温度即可得知蓄热量的大小。以最早结束融化的实验类型作为时间基准,比较相同时间内不同孔密度下所有热电偶的平均温度,平均温度高的蓄热量大,结果如图 9 所示。由图 9 可知:对于铜复合相变材料,孔密度为 2.36 mm^{-1}



(a) 孔密度为 0.79 mm^{-1}

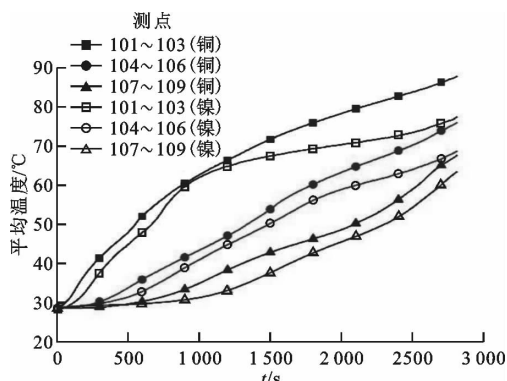
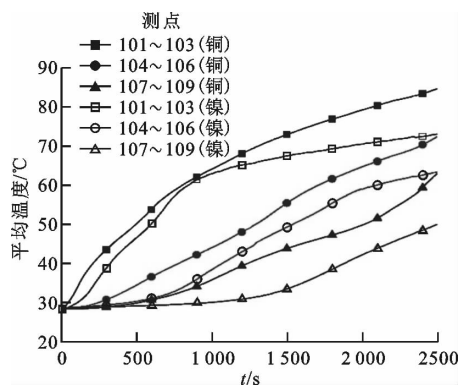
(b) 孔密度为 1.57 mm^{-1} (c) 孔密度为 2.36 mm^{-1}

图8 镍/铜复合相变材料测点平均温度比较

时蓄热量最多;对于镍复合相变材料,孔密度为 0.79 mm^{-1} 时蓄热量最多。

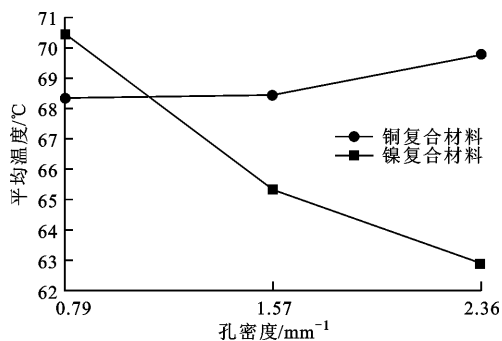


图9 镍/铜复合相变材料蓄热量比较

4 结 论

为了探究金属泡沫孔密度对石蜡融化性能的影响,设计搭建了相变蓄热实验台,制作了不同孔密度的复合相变材料。通过实验对比研究了镍复合相变材料和铜复合相变材料内部温度分布,研究了不同材料不同孔密度对复合相变材料导热换热强度和对流换热强度的影响,在相同时间内比较了镍复合相变材料和铜复合相变材料的蓄热量,主要结论如下。

(1)对于镍复合相变材料,随着孔密度的增大,温度堆积现象加重。铜复合相变材料相比镍复合相变材料响应时间均缩短,最大缩短幅度为 38%。

(2)镍复合相变材料的融化时间随着孔密度增大先增加后减小,铜复合相变材料表现出和镍复合相变材料相同的规律。

(3)对流换热强度随着孔密度的增大而减小,导热换热强度随着孔密度的增大而增大。对于镍复合相变材料,当孔密度为 1.02 mm^{-1} 时,对流和导热换热强度相等;对于铜复合相变材料,当孔密度为 1.26 mm^{-1} 时,对流和导热换热强度相等。

(4)相同时间内,铜复合相变材料比镍复合相变材料储存的热量更多。

(5)镍复合相变材料孔密度为 0.79 mm^{-1} 时对应的蓄热量最多,铜复合相变材料孔密度为 2.36 mm^{-1} 时对应的蓄热量最多。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] DHaidan N S, KHODADADI J M, AL-HATTAB T A, et al. Experimental and numerical investigation of melting of NePCM 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.

- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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): 759.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 王会. 管内填充金属泡沫的流动与传热特性 [D]. 西安: 西安交通大学, 2017: 2-3.
- [14] XIAO X, ZHANG P, LI M. Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 81: 94-105.
- [15] ZHAO C Y, LU W, TIAN Y. Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs) [J]. *Solar Energy*, 2010, 84(8): 1402-1412.
- [16] HUANG X, LIN Y, 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.
- [17] JIN H Q, FAN L W, LIU M J, et al. A pore-scale visualized study of melting heat transfer of a paraffin wax saturated in a copper foam: effects of the pore size [J]. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 2017, 112: 39-44.
- [18] 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, 95: 476-485.
- [19] QU Z G, LI W Q, WANG J L, et al. Passive thermal management using metal foam saturated with phase change material in a heat sink [J]. *Heat Mass Transfer*, 2012, 39(10): 1546-1549.
- [20] TIAN Y, ZHAO C Y. A numerical investigation of heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous metals [J]. *Energy*, 2011, 36: 5539-5546.
- [21] STRITIH U. An experimental study of enhanced heat transfer in rectangular PCM thermal storage [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 2841-2847.
- [22] 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.
- [23] INAYAT A, FREUND H, ZEISER T, et al. Determining the specific surface area of ceramic foams: the tetrakaidecahedra model revisited [J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(6): 1179-1188.
- [24] 刘伟, 范爱武, 黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 25-26.
- [25] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 11-12.
- [26] 朱明善, 刘颖, 林兆庄, 等. 工程热力学 [M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2011: 32-33.

(编辑 荆树蓉)