

# 泡沫铜/石蜡复合相变材料的制备及 储热特性研究

谢凌康, 曹雅馨, 杨 宾\*

(河北工业大学能源与环境工程学院, 天津 300401)

**摘要:** 为了提高相变材料的导热性能, 将石蜡与不同孔隙率的泡沫铜结合, 通过真空浸渍法制备得到泡沫铜/石蜡复合相变材料。对泡沫铜/石蜡复合相变材料进行了 SEM、XRD、DSC 及导热率测试。结果表明, 泡沫金属与石蜡浸渍吸附时仅存在物理混合, 不涉及任何化学变化。泡沫铜的加入极大地提升了材料整体的热传导效率。进而设计了复合相变材料的储热实验, 观察了均匀孔隙率和梯度孔隙率分布的复合相变材料的熔化过程, 分析泡沫金属对相变材料储热特性的影响机制。结果表明, 复合相变材料的温升速率随着孔隙率的增加而减少, 梯度孔隙率泡沫金属的布局相较于均匀孔隙率泡沫金属能够更有效地提升复合相变材料的传热性能。

**关键词:** 储热特性; 复合相变材料; 梯度分布; 泡沫铜; 石蜡; 孔隙率

**中图分类号:** TB34

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2025)10-0200-07

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.10.032

## Preparation of copper foam/paraffin composite phase change materials and study on their thermal storage characteristics

XIE Ling-kang, CAO Ya-xin, YANG Bin\*

(School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** In order to improve the thermal conductivity of phase change material, copper foam/paraffin composite phase change materials are prepared via vacuum impregnation method through combining paraffin wax with copper foam with different porosity, and characterized by means of SEM, XRD, DSC and thermal conductivity tests. It is indicated by the results that the impregnation and adsorption between foam metal and paraffin involve physical blending only, without any chemical changes. The addition of copper foam improves greatly the overall thermal conductivity of the material. Furthermore, thermal storage experiments are designed and performed for the composite phase change materials to observe the melting process of composite phase change materials with uniform porosity distribution and gradient porosity distribution, respectively. In addition, the affecting mechanism of foam metal on the heat storage characteristics of the phase change materials are analyzed. It is demonstrated that the temperature rise rate of the composite phase change materials decreases with the increase of porosity, and the foam metal with gradient porosity layout can enhance the heat transfer performance of the composite phase change materials more effectively than the foam metal with uniform porosity distribution.

**Key words:** thermal storage characteristics; composite phase change materials; gradient distribution; copper foam; paraffin; porosity

在全球范围内, 人们对能源的需求仍在持续攀升, 化石能源的短缺和严重的环境污染已经引起了人们的重视, 并开始对发展可再生能源系统产生极大兴趣<sup>[1-2]</sup>。迫在眉睫的气候变化威胁, 加上对化石燃料消耗有害影响的敏锐认识, 放大了可再生能源的吸引力。受环境和时间等因素的影响, 相变材料被选为与储能系统相关的出色材料之一<sup>[3]</sup>。有机相变材料最常用, 主要优点是过冷度小滞后可忽略不计、无腐蚀、可逆性好、无毒, 可分为石蜡和非石

蜡两类, 通常应用温度范围为 $-70\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。石蜡凭借其较高的相变潜热( $150\sim 250\text{ J/g}$ )、稳定的化学性质、经济的成本及易于获取的特点, 已成为相变材料研究领域的焦点。

然而, 大多数相变材料的导热性欠佳, 在相变过程中受到一定程度的制约, 响应时间长、存储效率低, 影响了其热量传递效率。因此, 在过去的几十年里, 国内外专家学者采取了多种方法, 如添加高导热填料<sup>[4-5]</sup>、使用泡沫金属作为吸附相变材料的载体、

收稿日期: 2025-01-17; 修回日期: 2025-08-05

基金项目: 天津市自然科学基金多元投入重点项目(22JCZDJC00760); 河北省教育厅科学研究项目资助(CXY2024027)

作者简介: 谢凌康(1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为建筑节能技术, xlk0210@163.com; 杨宾(1980-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为太阳能热利用技术、可再生能源高效转换技术、强化传热及建筑节能技术, 通讯联系人, yangbin0720@hebut.edu.cn。

对相变材料进行宏观/微观封装<sup>[6-7]</sup>。虽然添加大量的添加剂或优质的封装可以提高复合材料的导热性,但添加剂也会导致相变焓和复合相变材料储热能力的降低<sup>[8]</sup>。而高质量的封装过程可能非常复杂,不匹配的兼容性也会影响相变。泡沫金属是一种具有高比表面积和特有的多孔构造的材料,在提高热交换效率<sup>[9-11]</sup>、延长电池寿命<sup>[12-14]</sup>、生物医学<sup>[15-17]</sup>、太阳能发电<sup>[18-19]</sup>等众多应用领域里已经显示出了巨大的潜力。泡沫金属不与相变材料发生相变,稳定性与兼容性极为优异,是目前研究中提高相变材料热效率的最优方法之一。已有研究<sup>[20-23]</sup>表明,在相变材料中嵌入泡沫金属,可以显著增强传热能力,提高储热性能。

为了提高石蜡的导热性能,本文将其与泡沫铜结合,通过泡沫金属的高孔隙率和良好的导热性,克服纯石蜡在传热效率上的局限性,使用真空浸渍法制备得到泡沫铜/石蜡复合相变材料,使用 SEM、XRD、DSC 技术及导热率测试对复合材料的微观结构、物质组成与热性能进行了深入的分析。此外,进一步设计了复合相变材料的储热实验,观察复合相变材料的熔化过程,分析泡沫金属的均匀孔隙率及梯度孔隙率对相变材料储热特性的影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料选择与设备

实验选用的 58#石蜡购自抚顺文爱新科技有限公司,常温条件下,为白色半透明固体,无杂质和异味。导热率  $0.325 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。泡沫铜材料购自昆山壹铭隆电子材料有限公司,孔隙密度为 60 ppi,孔隙率分别为 82%、89%、95%。整体类似于泡沫状,呈现出均匀的铜色骨架结构。实验设备名称及其型号如表 1 所示。

表 1 实验设备

设备	型号	规格
真空干燥箱	DZF-605	最低限度-0.1 MPa
数据采集仪	34972A	测量精度 $\pm 0.1\%$
热电偶	K	精度 $\pm 0.1 \text{ K}$
PI 电加热膜	KSD 9700	电压 12 V,功率 25 W
DSC 测试仪	DSC200F3	温度范围-170~700℃,升温速率 0.001~100℃/min
扫描电子显微镜	7610F	二次电子像分辨率:高加速 1.0 nm/15.0 kV;低加速 1.3 nm/1.0 kV
X 射线粉末衍射仪	SmartLab-SE	满载功率 9 kW

### 1.2 复合相变材料的制备

由于泡沫金属的多孔结构含有空气,这会一定程度地阻碍相变材料向内部的渗透,降低浸渍率,因此应将泡沫金属中的空气抽走后再进行制备。本研究采用真空浸渍法<sup>[24]</sup>来制作泡沫金属/石蜡复合相变材料,具体步骤见图 1。将固体石蜡和切割成  $50 \text{ mm}\times 50 \text{ mm}\times 3 \text{ mm}$  尺寸的泡沫金属放入烧杯中,使泡沫金属块在固态石蜡上维持一定程度的倾斜,保证熔化后完全浸渍。烧杯放入真空干燥箱后,首先使用真空泵将干燥箱内部抽为真空状态,去除泡沫金属孔隙内部的空气。接着保持真空状态,设定真空干燥箱温度为  $120^\circ\text{C}$  以熔化石蜡。随着温度逐渐升高,石蜡由固态熔化至液态,泡沫金属逐渐沉入液体石蜡内,在下沉过程中浸入石蜡。待石蜡完全浸渍泡沫金属后,继续真空浸渍 180 min,浸渍完毕取出烧杯并使用  $20^\circ\text{C}$  恒温冷水冷却 120 min 至石蜡凝固。之后对烧杯加热 3~5 min 使复合相变材料与石蜡部分易于分离。取出浸渍完成的材料后对材料表面进行刮擦,以剔除粘附在表面的多余石蜡。

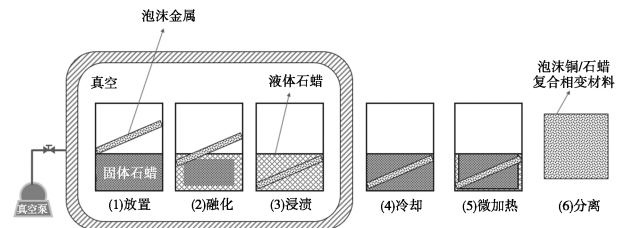


图 1 材料制备示意图

### 1.3 材料表征方法

采用扫描电子显微镜观察样品的微观形貌。采用 X 射线粉末衍射仪确定合成样品的物相,扫描角度为  $10^\circ\sim 90^\circ$ ,扫描速率为  $0.5(^\circ)/\text{min}$ 。采用差示扫描量热法(DSC)对石蜡及复合相变材料的热特性进行测定,加热速率设置为  $8^\circ\text{C}/\text{min}$ 。采用导热率测量仪(DRL-Ⅲ型)测量材料的导热率。

### 1.4 储热特性实验研究

#### 1.4.1 实验装置

采用恒定热通量热源加热方式对泡沫铜/石蜡进行加热熔化,使用直流电源( $0\sim 15 \text{ V}$ ,  $0\sim 5 \text{ A}$ )连接聚酰亚胺方形 PI 电热膜( $0\sim 12 \text{ V}$ ,  $0\sim 25 \text{ W}$ )作为蓄热实验的热源,并将铜板放置于热源与待测材料之间均匀分散热源产生的热量,减少局部过热,从而在材料表面实现更均衡的温度传导分布。使用亚克力板制成的长方体容器放置待测样品,具体布置如图 2 所示。

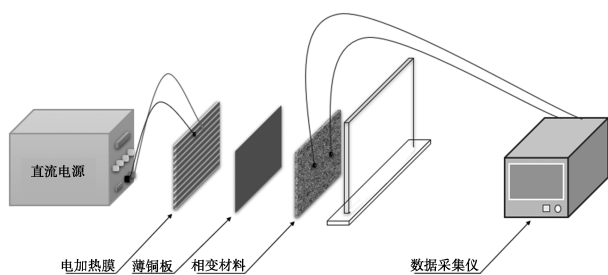


图 2 泡沫铜/石蜡蓄热实验

为了准确测量样品的温度变化,选择将热电偶放置在材料的中部,最大限度地减少由边界效应带来的干扰。通过数据采集仪记录了熔化过程中的温度变化,实验材料放置在恒定环境内,从而确保其起始温度与周遭环境温度维持相同的状态。本实验材料的起始温度即环境温度,为 28.5℃ 左右。

#### 1.4.2 梯度孔隙率分布

为维持相变材料储热性能的同时提高储热速率,本研究进一步设计了梯度孔隙率材料进行蓄热实验。较低孔隙率的泡沫金属传热效率更高,而高孔隙率的泡沫金属则更为适合需要隔热或减少热量散失的区域。实验在保持平均孔隙率相同的前提下,探究梯度结构布置对泡沫铜/石蜡复合相变材料传热性能的影响。将孔隙率由热源一侧向另一侧逐渐增加分布形式定义为正梯度孔隙率,孔隙率梯度下降的分布形式则为负梯度孔隙率,每组实验的孔隙率分布见表 2。

表 2 泡沫金属孔隙率分布

孔隙率分类	序号	方向	孔隙率分布
82%~95%	1	正梯度	82%~95%
	2	负梯度	95%~82%
	3	无梯度	89%~89%
82%~89%	1	正梯度	82%~89%
	2	负梯度	89%~82%
89%~95%	1	正梯度	89%~95%
	2	负梯度	95%~89%

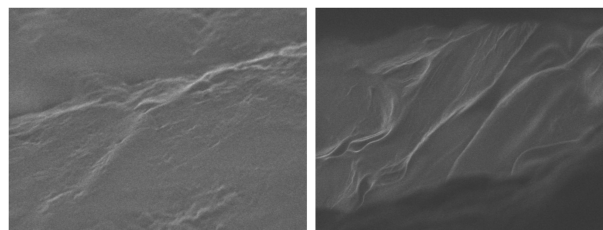
## 2 结果与讨论

### 2.1 材料的物理表征

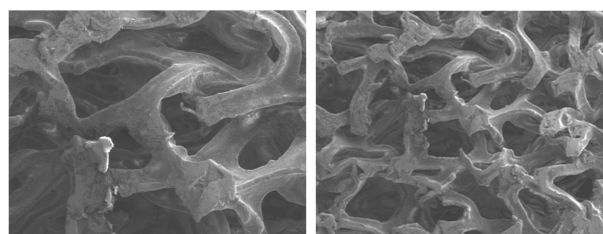
#### 2.1.1 SEM 分析

图 3 为纯石蜡、各不同孔隙率泡沫铜及泡沫铜/石蜡复合相变材料的 SEM 图。图 3(a) 中,纯石蜡的表面比较平滑,没有明显的凹凸不平或粗糙纹理。

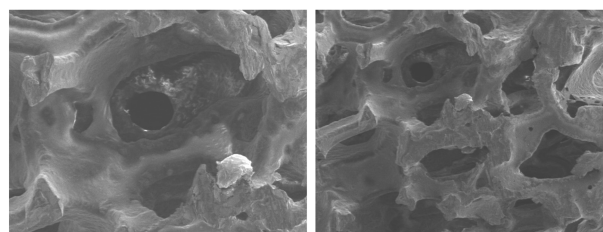
石蜡的颜色为均匀的单色,反映了其高纯度和良好的均质性。图 3(b)~(d) 中泡沫铜的多孔结构清晰可见,形成规则的蜂窝状结构。可以观察到,随着孔隙率的增加,孔洞的数量增多,分布也更为密集。对于孔隙率较低的泡沫铜而言,其骨架更为粗壮,高孔隙率则更为纤细。进一步观察发现,高孔隙率的泡沫铜在孔隙间的连通性方面表现更佳,更为连通的孔隙形成了更为开放的孔结构;低孔隙率的泡沫铜



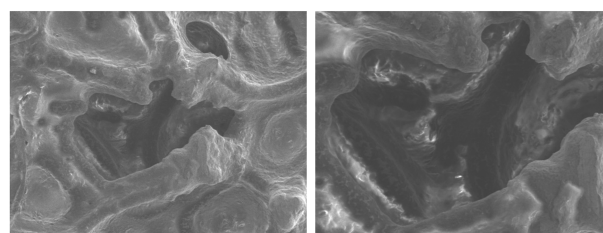
(a) 纯石蜡



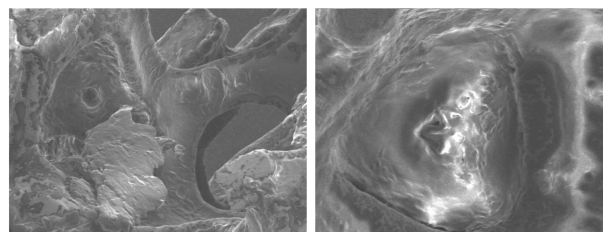
(b) 95% 孔隙率泡沫铜



(c) 89% 孔隙率泡沫铜



(d) 85% 孔隙率泡沫铜



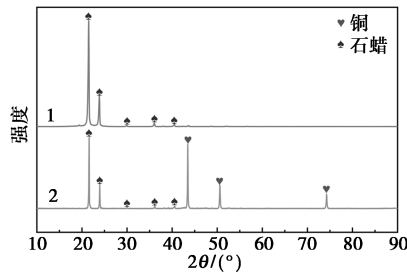
(e) 泡沫铜/石蜡复合相变材料

图 3 SEM 测试结果

孔隙之间的连通性则较差,孔结构更为封闭紧密。从图3(e)中可以看到石蜡很好地浸渍在泡沫铜的骨架内,更为直观地证实了材料制备的有效性。

### 2.1.2 XRD 分析

纯石蜡与泡沫铜/石蜡复合相变材料的 XRD 图如图4所示。石蜡展现出两个易于识别的主峰,同时,还有3个较为微弱但仍可清晰观察到的次峰。泡沫铜/石蜡的图谱同样呈现出上述的5个反射峰,这些反射峰的位置与纯石蜡的反射峰位置几乎没有差别,且峰强度与峰形变化十分相似。而较纯石蜡 XRD 图多出的3个峰则对应于泡沫铜的晶体结构,因此可以得出结论,泡沫金属/石蜡复合相变材料中并未出现新的物质,也没有发生过化学反应,只是单纯的物理混合。

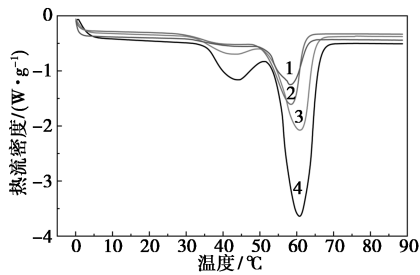


1—纯石蜡;2—泡沫铜/石蜡复合相变材料

图4 XRD 测试结果

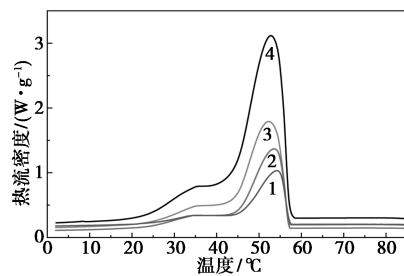
### 2.1.3 DSC 分析

图5与图6分别为相变材料熔化与凝固过程的



1—82%;2—89%;3—95%;4—石蜡

图5 熔化过程 DSC 曲线



1—82%;2—89%;3—95%;4—石蜡

图6 凝固过程 DSC 曲线

DSC 曲线。熔化与凝固过程中的潜热值可通过计算 DSC 曲线上峰值面积的方法来确定。这一方法基于热分析的基本原理,能够较为准确地反映出材料在相变过程中的能量变化。关于熔点与凝固点的温度确定,采用了外推起始温度的方法,即曲线最大斜率处切线与横轴相交的点所对应的温度。

热物性结果见表3。泡沫铜/石蜡的熔点、熔化潜热、凝固点与凝固潜热均小于纯石蜡,熔化潜热、凝固潜热随着泡沫铜孔隙率的降低而降低,95%、89%、82%泡沫铜/石蜡的熔化潜热相比纯石蜡分别降低44.48%、60.95%、74.69%;凝固潜热分别降低44.15%、60.43%、74.61%。这主要是因为随着泡沫铜孔隙率的降低,泡沫铜金属骨架的比例增加,影响相变材料在熔化和凝固过程中的流动状态和对流情况,从而影响潜热的吸收和释放。同时,孔隙率越低,石蜡的含量越少,总的潜热越低。

表3 相变材料热特性参数

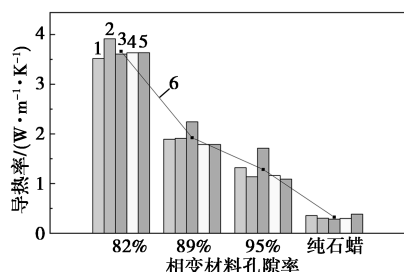
材料	熔点/ °C	熔化潜热/ (J·g <sup>-1</sup> )	凝固点/ °C	凝固潜热/ (J·g <sup>-1</sup> )
石蜡	54.44	206.48	57.14	201.56
95%泡沫铜/石蜡	52.88	114.64	56.84	112.58
89%泡沫铜/石蜡	50.09	80.63	56.98	79.75
82%泡沫铜/石蜡	51.45	52.27	57.11	51.18

泡沫铜/石蜡复合材料的熔化潜热和凝固潜热降低幅度显著超过石蜡质量减少的比例,这归因于几个关键因素:首先,泡沫铜的高导热系数在复合材料中加速了热量的传递,使得石蜡熔化速率提升,但同时也减少了固态石蜡的比例,从而导致熔化潜热和凝固潜热的降低;其次,尽管石蜡质量仅减少5%,但泡沫铜的加入增大了复合材料的总体积,进而降低了单位体积内石蜡的质量占比,进一步减少了单位体积的相变潜热;最后,在相变过程中,部分热量可能通过泡沫铜的金属脉络散失至周围环境,而非全部用于石蜡的相变过程,这同样降低了相变潜热。这些综合因素共同导致了泡沫铜/石蜡复合材料潜热的显著降低。

### 2.1.4 导热率测试

测得材料的导热率如图7所示。泡沫铜的添加极大地增强了相变材料的导热性能,纯石蜡的导热率为0.325 W/(m·K),而82%、89%、95%孔隙率的泡沫铜复合相变材料导热率分别为3.662、1.925、1.285 W/(m·K),比纯石蜡增加1026.77%、492.31%、295.38%。而导热率随着泡沫金属的孔隙率的降低

而升高,这是由于孔隙率降低意味着单位质量内泡沫金属的占比增加,因为金属本身具有较高的导热率,所以金属含量的增加会大幅提高整个样品的导热性能。

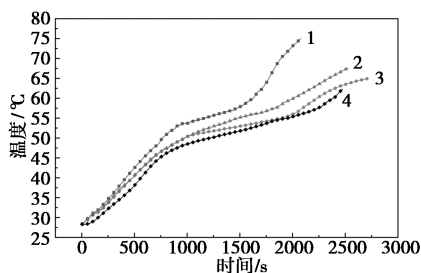


1—第 1 次测量;2—第 2 次测量;3—第 3 次测量;  
4—第 4 次测量;5—第 5 次测量;6—测量平均值

图 7 导热率测量数据

### 2.2 均匀孔隙率储热实验

由图 8 可以看出,在加热前期,测量温度呈现出明显的上升趋势。此时,固体石蜡受热吸收热量,温度快速攀升。当温度趋近 50℃ 时,升温速度开始逐渐减缓,相变材料进入相变阶段。相变过程本身是一个能量吸收或释放的过程,需要一定的时间来完成。在此期间,石蜡由固态变为固液混合态,逐步变为纯液态。当温度上升至 57℃ 以上时,升温速率再次加快,此时石蜡已全部熔化为液体,石蜡液体吸热继续快速升温。在固体升温阶段,温度增长速度随着孔隙率的增加而减小,这是由于吸附了石蜡的泡沫金属的骨架存在于石蜡的四周,由于金属的高导热性,加速了整体的热量传导。在体积一定的条件下,孔隙率越高,泡沫金属的比例越小,因此传热速率降低。孔隙率不同,泡沫铜/石蜡复合相变材料熔化过程所用时间也不同,石蜡及泡沫铜/石蜡复合相变材料的熔化时间见表 4。82%、89%、95% 孔隙率的泡沫铜/石蜡分别比石蜡加快了 34.77%、19.32%、8.18%。



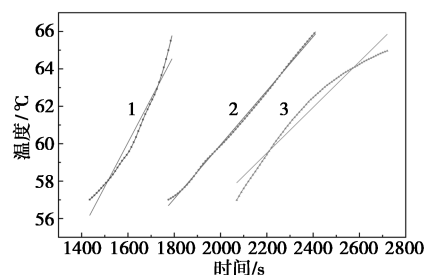
1—82%;2—89%;3—95%;4—石蜡

图 8 泡沫铜/石蜡复合相变材料熔化温度曲线

表 4 泡沫铜/石蜡复合相变材料熔化时间

材料分类	时间/s		
	28.5~57℃	较石蜡加快幅度/%	57~65℃
石蜡	2200	—	—
82%孔隙率泡沫铜/石蜡	1435	34.77	340
89%孔隙率泡沫铜/石蜡	1775	19.32	570
95%孔隙率泡沫铜/石蜡	2020	8.18	650

图 9 为石蜡熔化后期,液体升温阶段的线性拟合图,拟合方程见表 5。此时石蜡已完全熔化,不需吸收潜热改变相态,且液体升温阶段热容通常会较固体状态增大,因此温度变化率升高。在液体升温阶段,82%、89%、95% 孔隙率的泡沫铜/石蜡升至最高温度所用时间分别为 340、570、650 s。



1—82%;2—89%;3—95%

图 9 泡沫铜/石蜡液体升温图

表 5 液体升温过程拟合方程

材料分类	直线方程	R <sup>2</sup>
82%孔隙率泡沫铜/石蜡	y=0.024x+25.40	0.97
89%孔隙率泡沫铜/石蜡	y=0.014x+29.06	0.99
95%孔隙率泡沫铜/石蜡	y=0.012x+30.65	0.96

不同孔隙率泡沫铜/石蜡复合材料在完全熔化为液体的状态下所表现的升温速率不一致,这一现象的成因可以归结为 3 个方面:首先,低孔隙率泡沫铜的导热系数更高,加速热量传递;其次,较低的孔隙率能有效降低材料的热阻,进而促进热量的快速传递;此外,在低孔隙率的材料中,泡沫铜与石蜡之间的接触面积更大,这有助于提升热交换效率,从而加快升温过程。

### 2.3 梯度孔隙率储热实验

图 10(a) 为正梯度孔隙率 82%~95%、负梯度孔隙率 95%~82% 及均匀孔隙率 89% 泡沫铜/石蜡复合相变材料加热相变的温度-时间图。由图可知,在热源加热早期,泡沫金属的高导热性使热源热

量快速传导至相变材料,此时3种不同孔隙率分布的复合相变材料差别较小。随着时间的推移,正梯度孔隙率82%~95%的优势开始显现,此时温度增长速率依次为正梯度孔隙率、均匀孔隙率、负梯度孔隙率,这是由于材料与加热源接触的泡沫金属孔隙率不同,距离热源较近位置的孔隙率越小,热量传导越快,温度也更快升高。

当温度达到50℃左右时,石蜡开始进入相变阶段,此时正梯度孔隙率、均匀孔隙率、负梯度孔隙率所用时间分别为835、900、1 010 s。57℃时,升温速率由低变高,表明相变过程完成,至此熔化过程结束。正梯度孔隙率、均匀孔隙率的总熔化时间分别比负梯度孔隙率减少了9.40%、2.28%。因此,与均匀孔隙率、负梯度孔隙率的熔化速率相比,正梯度孔隙率泡沫金属复合相变材料表现出更好的传热效果。

图10(b)中,正梯度孔隙率82%~89%、负梯度孔隙率89%~82%达到相变温度的时间分别为730、

755 s,整个熔化过程正梯度孔隙率比负梯度孔隙率节省了70 s。

图10(c)给出了89%~95%、95%~89%梯度孔隙率的温度变化。固体吸热时,正梯度孔隙率的升温时间为负梯度孔隙率的78.26%,整体熔化时间比负梯度孔隙率减少了13.88%。

### 3 结论

本研究使用真空浸渍法制备得到泡沫铜/石蜡复合相变材料,设计了复合相变材料的储热实验,分析均匀孔隙率及梯度孔隙率对相变材料储热特性的影响,得到以下结论。

(1) 泡沫金属/石蜡复合相变材料在泡沫金属与石蜡浸渍吸附时仅存在物理混合,不涉及任何化学变化。

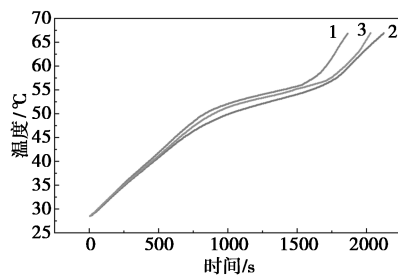
(2) 泡沫铜的加入极大地提升了材料整体的热传导效率,82%、89%、95%孔隙率的泡沫铜复合相变材料的导热率分别比纯石蜡增加1 026.77%、492.31%、295.38%。

(3) 在均匀孔隙率的储热实验中,固体升温阶段的温升速率随着孔隙率的增加而减少,82%、89%、95%孔隙率的泡沫铜/石蜡完全熔化时间分别比石蜡加快了34.77%、19.32%、8.18%。液体升温期间,温升速率仍随着孔隙率的增加而减小。

(4) 梯度孔隙率泡沫金属的布局相较于均匀孔隙率泡沫金属能够更有效地提升复合相变材料的传热性能。正梯度孔隙率、均匀孔隙率的总熔化时间分别比负梯度孔隙率减少了9.40%、2.28%。

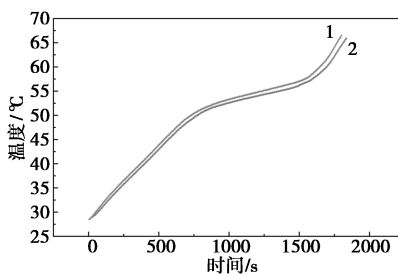
### 参考文献

- [1] He W, Abbas Q, Alharthi M, *et al.* Integration of renewable hydrogen in light-duty vehicle: Nexus between energy security and low carbon emission resources [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(51): 27958–27968.
- [2] Duan H, Zhou S, Jiang K, *et al.* Assessing China's efforts to pursue the 1.5℃ warming limit [J]. *Science*, 2021, 372(6540): 378–385.
- [3] Kumar M R, Kartikey V, Vinayak M, *et al.* A review on carbon-based phase change materials for thermal energy storage [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104166.
- [4] Jebasingh B E, Arasu A V. A comprehensive review on latent heat and thermal conductivity of nanoparticle dispersed phase change material for low-temperature applications [J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 24: 52–74.
- [5] Keshteli A N, Sheikholeslami M. Nanoparticle enhanced PCM applications for intensification of thermal performance in building: A review [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, 274: 516–533.



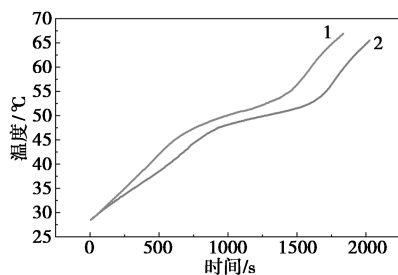
1—正梯度;2—负梯度;3—89%

(a) 82%~95%



1—正梯度;2—负梯度

(b) 82%~89%



1—正梯度;2—负梯度

(c) 89%~95%

图10 泡沫铜/石蜡液体温升图

- [6] Zhong Y J, Zhao B C, Lin J, *et al.* Encapsulation of high-temperature inorganic phase change materials using graphite as heat transfer enhancer[J]. *Renewable Energy*, 2019, 133: 240–247.
- [7] Zhuang X, Zhang Y, Cai C, *et al.* Design the magnetic microencapsulated phase change materials with poly(MMA-MAA@n-octadecane modified by  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1–11.
- [8] Chen X, Gao H Y, Tang Z D, *et al.* Optimization strategies of composite phase change materials for thermal energy storage, transfer, conversion and utilization [J]. *Energy & Environmental Science*, 2020, 13(12): 4498–4535.
- [9] Muneeshwaran M, Yang C M, Cakmak E, *et al.* Augmentation of pool boiling heat transfer on tube bundles using metal foam[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121812.
- [10] Ashreet M, Prashant S, Like L. Heat transfer model for moving packed-bed particle-to- $\text{CO}_2$  heat exchangers integrated with metal foams[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 239: 122062.
- [11] Chandora N, Mani A, Advait S. Investigation of heat transfer and pressure drop characteristics in metal-foam filled channels in a plate heat exchanger: A comparative experimental study [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 241: 122368.
- [12] Saxena V, Sharma A, Kothari R, *et al.* Analysis of Li-ion battery under high discharge rate embedded with metal foam phase change composite: A numerical study[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 84(PA): 110752.
- [13] Yang M, Mathew G, Nemati H, *et al.* A novel approach for active cooling of a battery at cell level: Air-cooled mini-channel heat sink, enhanced with intermittent metal foam [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 81: 110374.
- [14] Yu X K, Tao Y B, Deng Q Q. Experimental study on thermal management of batteries based on the coupling of metal foam-paraffin composite phase change materials and air cooling [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 84(PB): 110891.
- [15] Makena I M, Shongwe M B. Effects of porosity on the corrosion behaviour of PM-fabricated titanium foams for biomedical applications [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2024, 19(3): 100495.
- [16] Li H M, Fang J D, Yao K J, *et al.* Construction of asymmetric dual-layer polysaccharide-based porous structure on multiple sources for potential application in biomedicine [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 254(P3): 127361.
- [17] Fan J H, Yao X L, Yan Z H, *et al.* Covalent organic framework modified nickel foam adsorbents for dispersive micro-solid phase extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from Chinese herbal medicines [J]. *Microchemical Journal*, 2023, 195: 109444.
- [18] Tan W C, Saw L H, Thiam H S. Overview of porous media/metal foam application in fuel cells and solar power systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 96: 181–197.
- [19] Yu J, Wang Y W, Qi C, *et al.* Photothermal and thermoelectric performance of PCMs doped with nanoparticles and metal foam [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 143: 106712.
- [20] Yao Y P, Wu H Y. Thermal transport process of metal foam/paraffin composite (MFPC) with solid-liquid phase change: An experimental study [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 179: 115668.
- [21] Hu X S, Zhu F, Gong X L. Experimental and numerical study on the thermal behavior of phase change material infiltrated in low porosity metal foam [J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 26: 101005.
- [22] D'Andrea A, Ruggiero L. Melting of PCMs embedded in copper foams: An experimental study [J]. *Materials*, 2021, 14(5): 1195.
- [23] Marcello I, Mauro M, Sauro F, *et al.* Metal foam/PCM melting evolution analysis: Orientation and morphology effects [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 187: 116572.
- [24] 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. ■
- (上接第 199 页)
- [21] Yu Y, Song J, Zhang Z, *et al.* Efficient recovery of phosphate by L-MOFs: An excellent adsorption performance and mechanism [J]. *Progress in Natural Science; Materials International*, 2023, 33(6): 854–863.
- [22] Fan Y, Lu T, Wang X, *et al.* Fabrication of dual-functional Zr-based MOF incorporating amino and sulfoxide derivatives for simultaneous removal and detection of tetracycline antibiotics [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 339: 126676.
- [23] Wang Q, Bai X, Sun S, *et al.* Deep eutectic system based  $\text{C}_3\text{N}_4$ -Zr composite material for highly efficient removal of fluoride in hydrochloric acid [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 342: 126985.
- [24] Song W, Zhang L, Guo B, *et al.* Quaternized straw supported by  $\text{La}(\text{OH})_3$  nanoparticles for highly-selective removal of phosphate in presence of coexisting anions: Synergistic effect and mechanism [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 324: 124500.
- [25] Fu H, Yang Y, Zhu R, *et al.* Superior adsorption of phosphate by ferrihydrite-coated and lanthanum-decorated magnetite [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 530: 704–713.
- [26] Guo Q, Li L, Zhao Z, *et al.* Enhanced piezoelectric catalysis of  $\text{BaTiO}_3$  by ZVAL for mechanochemical defluorination of PFOA: Promotion of electron transfer [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 465: 133040.
- [27] Khosroshahi N, Doae S, Safarifar V, *et al.* A comprehensive study about functionalization and de-functionalization of MOF-808 as a defect-engineered Zr-MOFs for selective catalytic oxidation [J]. *Heliyon*, 2024, 10(10): e31254.
- [28] Tang Q, Shi C, Shi W, *et al.* Preferable phosphate removal by nano- $\text{La}(\text{III})$  hydroxides modified mesoporous rice husk biochars: Role of the host pore structure and point of zero charge [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 662: 511–520.
- [29] Su Y, Yang W, Sun W, *et al.* Synthesis of mesoporous cerium-zirconium binary oxide nanoadsorbents by a solvothermal process and their effective adsorption of phosphate from water [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 268: 270–279.
- [30] Mechat F, Djilani C, Bougdah N, *et al.* Adsorption of methylene blue onto activated carbon prepared under  $\text{N}_2$ /microwave radiation supported cobalt: Kinetics, isotherms, and thermodynamics studies [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2023, 284: 288–300. ■