

# 金属材料增强的石蜡储热性能研究

马预谱 胡锦涛 陈奇 罗小兵

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

**摘要** 本文主要通过实验对比研究铝翅片和泡沫金属铜对石蜡的储热性能和储热密度的综合影响, 分别测试封装纯石蜡、封装石蜡的同时加装平行铝翅片、将石蜡填充到泡沫金属铜空隙三组散热器的热源温度上升曲线。实验得出: 加装铝翅片和填充泡沫金属铜能使热源与石蜡的平均温差分别降低 76%和 18%, 同时使储热阶段热源的平均温度分别降低 22.2°C 和 9.5°C, 因此加装铝翅片增强石蜡储热性能强于填充泡沫金属铜。加装铝翅片和填充泡沫金属铜导致整体储热密度分别减少 40.3%和 4.2%, 从储热密度方面考虑泡沫金属铜明显优于铝翅片。因此我们需要综合考虑储热性能和储热密度的影响选择最合适的增强石蜡储热的方式。

**关键词** 石蜡相变材料; 泡沫金属铜; 储热性能增强

**中图分类号:** TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2016)10-2196-06

## Study on Heat Storage Performance Enhancement of Paraffin by Metallic Material

MA Yu-Pu HU Jin-Yan CHEN Qi LUO Xiao-Bing

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** In this paper, experiments were conducted on effects on heat storage performance and heat storage density of paraffin using aluminum plate-fin and copper metal foam. Temperature-time curves of heat source of pure paraffin, aluminum plate-fin and copper metal foam were obtained, respectively. The results show that the temperature difference between heat source and paraffin was reduced by 76% and 18%, and the average temperature of heat source during heat storage process was reduced by 22.2°C and 9.5°C with the use of aluminum plate-fin and copper metal foam, respectively. From that point, aluminum plate-fin is better than copper metal foam. On the other hand, the total heat storage density was reduced by 40.3% and 4.2% using aluminum plate-fin and copper metal foam, respectively. From that point, copper metal foam is better than aluminum plate-fin. Therefore, the suitable heat storage enhancement of paraffin is chosen based on the combined effects on heat storage performance and heat storage density.

**Key words** phase change material; copper metal foam; heat storage performance enhancement

## 0 引 言

相变材料在相变过程中能吸收或释放出大量的潜热, 且相变过程中温度几乎不变, 因而广泛应用于各种电子产品的散热中, 特别是间歇性工作的电子元器件的热封装中。在工作时段将电子器件产生的大量热量储存在相变材料中, 在非工作时段再将储存的热量释放到环境中<sup>[1]</sup>。石蜡作为一种相变材料, 具有相变潜热大, 固-液相变过程体积变化小, 热稳定性好, 无过冷现象, 价格较低廉等优点<sup>[2]</sup>, 使之在高功率电子元器件的热封装中得到了大量应用。但由于石蜡导热系数小, 使得储热速率低, 热源温升快, 不利于电子元器件的高可靠性工作<sup>[3]</sup>。近年来, 国

内外许多专家学者都在研究提高石蜡类相变储热材料的导热性能, 通常采取的措施是在相变材料中添加金属填料、石墨、碳纤维、在封装壁面上加肋片以及进行胶囊封装或将不同的相变材料进行组合等<sup>[4]</sup>, 由此来提高储热系统储、放热的速率。本文将主要对比研究加装铝翅片和填充泡沫金属铜这两种增强方式。

Zhao 等<sup>[5]</sup>在相变材料中填充泡沫金属铜来提高石蜡的导热性能, 结果表明: 加入泡沫金属铜后其总传热系数提高了 3~10 倍, 而凝固过程的时间也降低了一半多, 大大加快了传热速率。Parlak 等<sup>[6]</sup>

收稿日期: 2016-03-10; 修订日期: 2016-09-22

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51576078)

作者简介: 马预谱 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事极端条件下的热管理。通信作者: 罗小兵, 教授, Email: Luoxb@hust.edu.cn

在用于电子设备散热的翅片散热器中填充石蜡, 与没填充 PCM 的翅片相比, 温度下降了 7~8°C, 起到了保护电子设备的作用。Stritih<sup>[7]</sup> 在一个矩形容器内研究了翅片对石蜡放热的传热强化, 计算出不同条件下传热性能提高的效率。由上述文献得出填充泡沫金属铜和加装翅片都能增大石蜡的导热性能, 从而改善其储热性能。还有许多研究者将泡沫金属铜和翅片对相变材料的影响进行了对比研究。张涛等<sup>[8]</sup> 分别以泡沫铜填充石蜡为例, 与用铜、铝翅片并联和串联两种方式填充石蜡时的有效导热系数进行了计算对比; 结果显示填充泡沫金属铜能改善相变材料的储热性能和效率, 并且整体效果要比加装翅片好。

在上述研究工作中, 只是单独地考虑了石蜡的有效导热系数而得出填充泡沫金属铜的整体效果强于翅片, 没有考虑其他储热性能比如储热起始时间、储热温度等以及翅片和泡沫金属铜增加的体积对整体储热密度的影响。因此本文将在封装等质量石蜡的条件下, 综合对比研究填充泡沫金属铜和加装铝翅片对石蜡的储热性能和储热密度的综合影响。

## 1 石蜡相变过程传热分析

在进行石蜡相变储热实验时, 将石蜡填充在铝金属空腔中, 其结构示意图如图 1 所示。

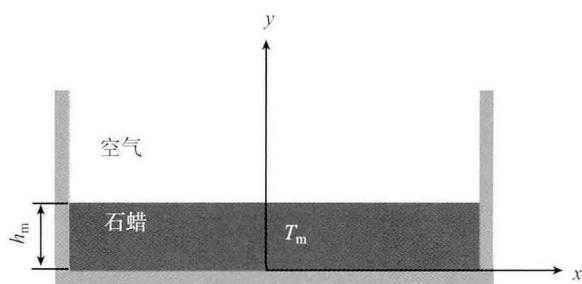


图 1 石蜡相变模块结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of phase-change model of paraffin

为了简化分析过程, 我们做出以下假设: 忽略热源到散热器底部的扩散热阻和所有的接触热阻; 由于铝合金导热系数远大于石蜡的导热系数, 因此我们假设散热器底部和垂直翅片都看做等温面; 同时忽略石蜡与空气的自然对流换热。因此, 石蜡的能量方程可以表示为:

$$\lambda_m \left[ \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} \right] = \rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial t} \quad (1)$$

其中,  $\lambda_m$ 、 $\rho_m$ 、 $c_m$ 、 $T_m$  分别为石蜡的导热系数、密度、比热容和温度。石蜡在相变过程中的比热容  $c_m$

可以用公式 (2) 表示:

$$c_m = \begin{cases} c_s & T_m < T_0 \\ c_s + \frac{L}{\Delta T} & T_0 \leq T_m < T_0 + \Delta T \\ c_l & T_m \geq T_0 + \Delta T \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $c_s$ 、 $c_l$  分别为固态和液态石蜡的比热容,  $L$  为石蜡的相变潜热,  $T_0$ 、 $\Delta T$  分别为熔化温度和熔化过程中石蜡的温度变化。石蜡的边界条件可以表达为:

$$\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (3)$$

$$\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial y} \Big|_{y=h_m} = h(T_m - T_\infty) \quad (4)$$

式中,  $h$  为石蜡与空气的自然对流换热系数,  $T_\infty$  为环境温度。

从上述分析中我们可以看出石蜡的导热系数是一个影响相变过程的重要参数, 但是纯石蜡的导热系数很小, 导致从热源到相变材料的传热速率很慢, 不利于热源的散热。基于石蜡自身低导热率引起的问题, 本文采用两种金属材料结构平板铝翅片和泡沫金属铜提高石蜡的有效导热系数。

## 2 实验装置与实验方法

为了研究加装平行铝翅片和填充泡沫金属铜对石蜡的储热性能增强作用, 本次实验分别采用三组散热器对热源进行散热。三组散热器的具体结构如图 2 所示, 第一组为填充有纯石蜡的空腔散热器; 第二组为铝翅片散热器, 在空腔散热器的空腔中等距离的安装了 9 个厚度为 2 mm 平行铝翅片, 然后将石蜡填充在中间形成的 10 个空腔中; 第三组为泡沫金属铜散热器, 泡沫金属铜的具体结构如实物图 3

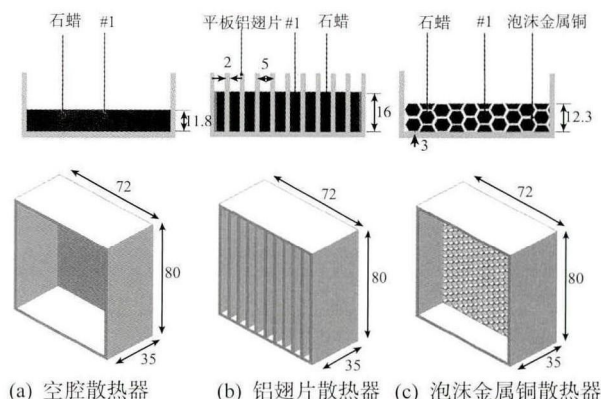


图 2 三种不同形式散热器结构及热电偶#1 分布示意图

Fig. 2 Structure schematic of three types of heat sinks and the distribution of thermocouple #1

表 1 三组散热器具体参数

Table 1 Specific parameters of three types of heat sinks

散热器种类	总质量(含石蜡)/g	额外增加体积/cm <sup>3</sup>	石蜡高度/mm	#1 热电偶高度/mm
空腔散热器	147	0	11.8	5.9
铝翅片散热器	210	41.04	16	8
泡沫铜散热器	171	2.7	12.3	6.15

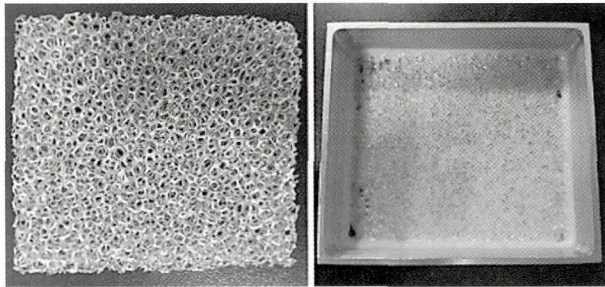


图 3 泡沫金属铜实物图

Fig. 3 Physical figure of copper metal foam

所示,在抽真空后石蜡均匀地填充在泡沫金属铜的空隙中,因此泡沫金属铜额外增加体积很小。

本实验采用的石蜡导热系数为  $0.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 固态石蜡密度为  $0.86 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 液态石蜡的密度为  $0.84 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。根据石蜡的 DSC 测试曲线,石蜡的融化过程是个持续升温的过程,随着温度的升高,石蜡在  $46.12^\circ\text{C}$  开始发生相变,在  $47.48^\circ\text{C}$  相变过程结束,石蜡在融化相变过程的潜热为  $244.38 \text{ kJ}/\text{kg}$ 。三种散热器基体材料和翅片材料都是 6061 铝合金,导热系数为  $155 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ; 泡沫金属铜孔隙率为 97.85%, PPI 为 30。

三组散热器的外形尺寸均为  $72 \text{ mm}\times 80 \text{ mm}\times 35 \text{ mm}$ , 腔体四周壁厚均为  $2 \text{ mm}$ , 底部壁厚为  $3 \text{ mm}$ 。三组散热器填充的石蜡相等,使得石蜡能占据铝翅片散热器 10 个空腔体积的一半,根据每个空腔的尺寸为  $5 \text{ mm}\times 76 \text{ mm}\times 32 \text{ mm}$  以及液态石蜡的密度,我们可以算得所需石蜡的总体积和总质量分别为  $60.8 \text{ cm}^3$  和  $51 \text{ g}$ 。表 1 为三组散热器的相关具体参数。

实验装置如图 4 所示,主要包括热源(加热面积为  $30 \text{ mm}\times 30 \text{ mm}$ ), 直流稳压稳流电源、数据采集仪、计算机、热电偶和封装有石蜡的散热器。热源布置在散热器的底部,并且热源和散热器之间均匀的涂有一层薄的导热硅脂,以便减小接触热阻并提高导热速率。热源周围包覆着聚四氟乙烯绝热材料,以减少热量朝其他方向的散失从而保证加热功率的准确性。电源提供三种恒定的输入功率:  $10 \text{ W}$ 、 $20 \text{ W}$  和  $30 \text{ W}$ 。实验中总共布置了三个热电偶: #1 热电偶置于石蜡的中心位置(具体布置方式如图 2), #2 热电偶置于热源中心, #3 热电偶置于空气中。数

据采集仪将实时采集三个热电偶分别测得的石蜡、热源和环境温度输入到计算机中进行存储、处理和分析。

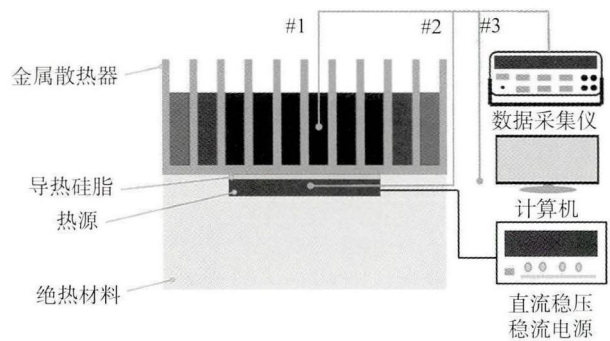


图 4 实验装置示意图

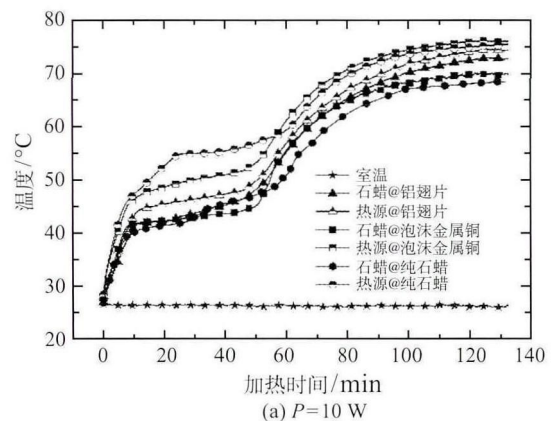
Fig. 4 Schematic diagram of experimental set-up

### 3 实验结果及分析

本次实验我们综合对比研究三组散热器在输入功率为  $P_1=10 \text{ W}$ 、 $P_2=20 \text{ W}$ 、 $P_3=30 \text{ W}$  三种工况下石蜡的储热性能和储热密度,主要是测试热源和石蜡温度随加热时间的上升曲线。实验中环境温度为  $(27\pm 0.5)^\circ\text{C}$ , 整个实验装置处于大空间自然对流环境中。

#### 3.1 储热性能对比分析

图 5 为热源输入功率分别为  $P_1=10 \text{ W}$ 、 $P_2=20 \text{ W}$ 、 $P_3=30 \text{ W}$  时三组散热器的热源温度和石蜡温度随时间变化的曲线。

(a)  $P=10 \text{ W}$

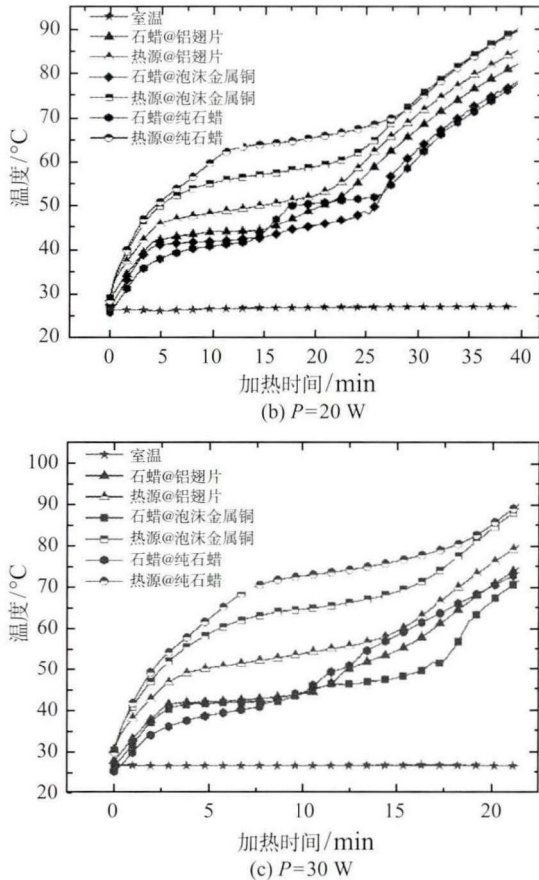


图 5 散热器的热源和石蜡温升曲线图

Fig. 5 Temperature-time curves of heat source and paraffin (a)  $P_1=10\text{ W}$ , (b)  $P_2=20\text{ W}$ , (c)  $P_3=30\text{ W}$

从这三组曲线中我们可以看出：同一组散热器中石蜡温度和热源温度变化趋势基本一致，并且在加热过程中热源温度始终大于石蜡温度，显然温差是由两者之间的传热热阻引起的。对于同一输入功率的三组散热器，根据实验数据可以得到整个加热阶段热源与石蜡的总平均温差，具体数据如图 6 所示：

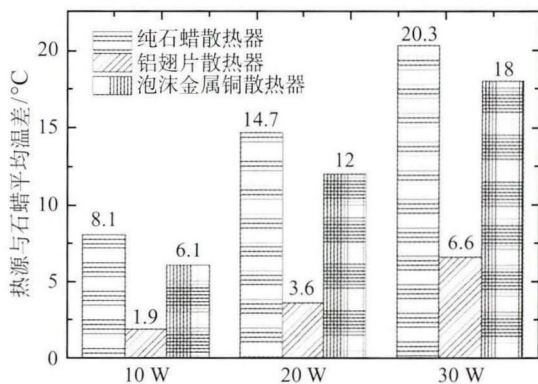


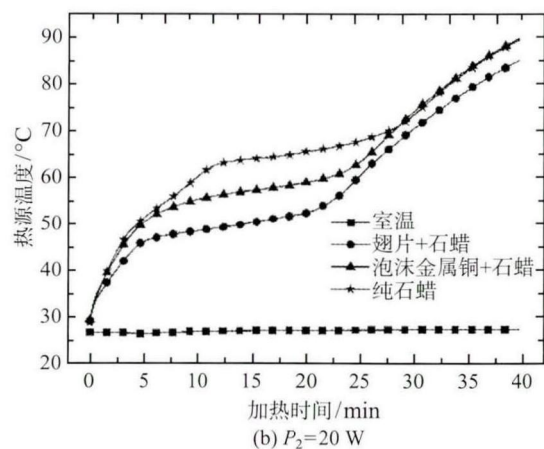
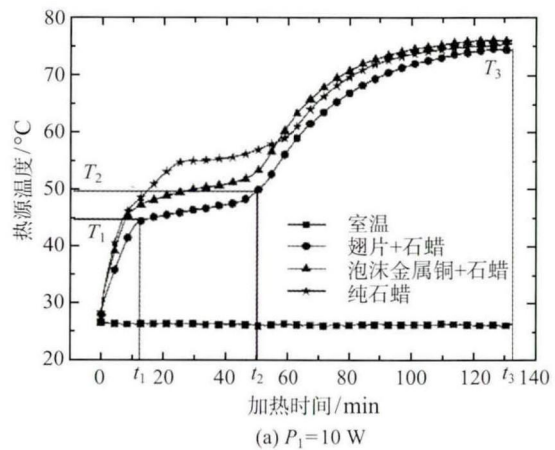
图 6  $P_1=10\text{ W}$ 、 $P_2=20\text{ W}$ 、 $P_3=30\text{ W}$  三组散热器热源与石蜡的总平均温差

Fig. 6 Mean temperature difference between heat source and paraffin of three heat sinks

当输入功率为 20 W 时，与空腔散热器相比，铝翅片散热器和泡沫金属铜散热器的热源与石蜡温差分别减小了 76% 和 18%，说明了纯石蜡的传热热阻最大，填充泡沫金属铜次之，加装翅片最小，即  $R_{空腔} > R_{泡沫金属铜} > R_{翅片}$ 。由此可以看出：翅片和泡沫金属铜都能减小热源与石蜡之间的传热热阻，有效增强石蜡的传热速率，并且翅片增强效果远强于泡沫金属铜。

本实验重点关注石蜡的储热性能对热源温度的影响，因此接下来将研究热源的温升曲线。图 7 分别为在热源输入功率为  $P_1=10\text{ W}$ 、 $P_2=20\text{ W}$ 、 $P_3=30\text{ W}$  时三组散热器的温升曲线。由图可以看出热源温度在时间  $T_1$  和  $T_2$  出现两个明显的转折点，在这两个转折点对应的热源温度分别为  $T_1$  和  $T_2$ ，并且两个转折点将温度上升过程分为第一升温阶段  $0 \sim T_1$ 、第二升温阶段  $T_1 \sim T_2$  和第三升温阶段  $T_2 \sim T_3$ 。

在第一升温阶段和第三升温阶段斜率都较大，第二升温阶段斜率有明显的降低。第一升温阶段为固态石蜡吸热逐渐熔化的过程；第二升温阶段在不断吸收热量的同时温度上升不大，很明显为相变储热阶段；第三升温阶段为液态石蜡吸热过程。我们



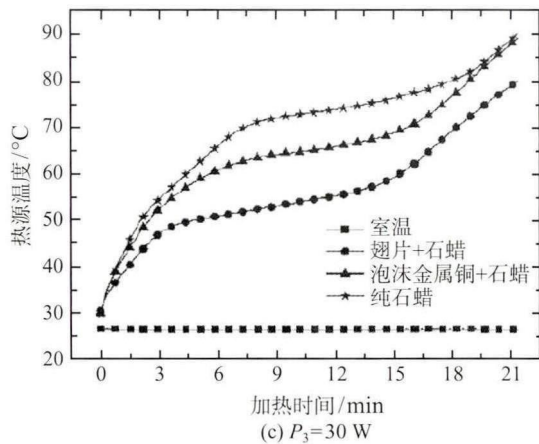


图 7 散热器的热源温升曲线图

Fig. 7 Temperature-time curves of heat source (a)  $P_1=10$  W, (b)  $P_2=20$  W, (c)  $P_3=30$  W

把第二升温阶段热源温升记为  $\Delta T$ , 持续时间为  $\Delta t$ , 热源平均温度为  $T_{av}$ . 第三升温阶段在加热终止时刻  $T_3$  的温度记为  $T_3$ . 时间单位均为 min, 温度单位均为  $^{\circ}\text{C}$ . 具体数据整理如表 2 所示.

第一步先横向比较相同功率输入工况下三组散热器的储热性能, 以  $P_2=20$  W 为例详细说明热源温升过程中现象.

由表 2 可以得出以下结果: 三组散热器转折点时刻  $T_1$  分别为 11、5 和 6 min, 铝翅片散热器对应的转折点出现时间最早 ( $T_1$  最小), 说明对应的石蜡相变过程出现最早, 即从热源到石蜡的热流密度最大, 说明了加装翅片能增强石蜡的有效导热系数. 同理, 泡沫金属铜也能达到相当的增强石蜡导热系数的效果. 三组散热器的储热持续时间  $\Delta T$  大致相等, 这主要是因为等质量的石蜡完全相变吸收的热量也相等, 所持续的时间也近似相等. 对于第二升温阶段即储热阶段的平均温度  $T_{av}$ , 我们从表 2 可以看出  $T_{av, \text{空腔}} > T_{av, \text{泡沫金属铜}} > T_{av, \text{翅片}}$  这说明翅片组热源本身

吸收热量最少, 更多的热量被更快地传导到石蜡中, 这同样说明了翅片增强石蜡传热能力强于泡沫金属铜. 接下来分析加热终止温度, 可以看出翅片组终止温度最小, 而纯石蜡组合和泡沫金属铜组相当, 由此我们可以得出翅片能在加热时间段内整体降低热源的温度, 进一步保护电子器件.

第二步再纵向对比不同输入功率的工况下石蜡的储热性能. 当加热功率增大时, 储热阶段对应的转折点时间  $T_1$  越小, 说明石蜡传热速率更快; 并且储热持续时间从 40 min 降到 16 min 再到 9 min, 储热平均温度也不断增大, 这表明石蜡的储热时间随着加热功率增大而明显减弱. 为了便于分析, 我们做出如图 8 所示在三种输入功率下铝翅片散热器组和泡沫金属铜散热器组的储热平均温度相比空腔散热器组储热平均温度的温差变化图.

从图 8 中可以看出, 随着输入功率增大, 铝翅片组储热平均温度分别降低  $10.1^{\circ}\text{C}$ 、 $16.4^{\circ}\text{C}$  和  $22.2^{\circ}\text{C}$ , 说明加装翅片增强储热作用随着功率的提高效果越明显. 另外一方面, 泡沫金属铜组储热平均温度降低值随功率变化波动较小.

由此可以看出, 在高功率输入时, 铝翅片散热器增强石蜡储热性能的效果更显著; 而对于泡沫金属铜散热器, 增强石蜡传热的作用随着输入功率的增大基本没有变化.

### 3.2 储热密度对比分析

考虑到加装翅片和填充泡沫金属铜增加的额外体积, 使得单位体积的储热量即储热密度减少. 本次实验封装石蜡的质量相等, 因此三组散热器整体储热量均为  $51 \text{ g} \times 244.38 \text{ J/g} = 12463.38 \text{ J}$ . 由于石蜡本身所占的体积为  $60.8 \text{ cm}^3$ , 可得纯石蜡的储热密度为  $205 \text{ J/cm}^3$ . 加装翅片增加的体积为  $9 \times 2 \times 76 \times 32 = 41.04 \text{ cm}^3$ , 则其储热密度为  $122.4 \text{ J/cm}^3$ . 至于泡沫金属铜, 由于有很多空隙, 石蜡可

表 2  $P_1=10$  W、 $P_2=20$  W、 $P_3=30$  W 三组散热器热源温升曲线特征值

Table 2 The characteristic values of temperature-time curves of heat source of three types of heat sinks

加热功率	散热器种类	$T_1/\text{min}$	$T_2/\text{min}$	$\Delta t/\text{min}$	$T_3/\text{min}$	$T_1/^{\circ}\text{C}$	$T_2/^{\circ}\text{C}$	$T_{av}/^{\circ}\text{C}$	$T_3/^{\circ}\text{C}$
$P_1=10$ W	空腔散热器	25	65	40	132	55	62	56.7	75
	铝翅片散热器	12	50	38	132	45	50	46.6	74
	泡沫铜散热器	13	52	39	132	47	53	50.3	75.5
$P_2=20$ W	空腔散热器	11	28	17	40	63	70	65.8	90
	铝翅片散热器	5	20	15	40	46	52	49.4	85
	泡沫铜散热器	6	23	17	40	53	60	56.9	90
$P_3=30$ W	空腔散热器	9	18	9	21	73	80	75.4	90
	铝翅片散热器	5	13	8	21	50	56	53.2	80
	泡沫铜散热器	6	13	9	21	63	70	65.9	89

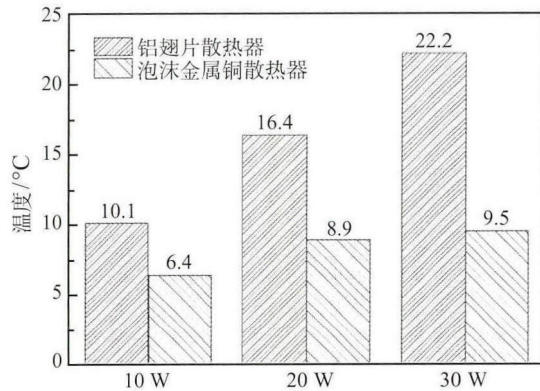


图 8 三种输入功率下铝翅片散热器和泡沫金属铜散热器储热平均温度降低值变化图

Fig. 8 The temperature difference of heat source during phase-change process between aluminum finned heat sink and pure-paraffin heat sink, metal-foam heat sink and pure-paraffin heat sink, respectively

以填充到这些空隙中, 因此增加的体积只是金属铜自身的体积, 即  $2.7 \text{ cm}^3$ , 因此其储热密度为  $196.3 \text{ J/cm}^3$ 。所以, 与纯石蜡相比加装翅片和填充泡沫金属铜导致储热密度分别减少了 40.3%和 4.2%。

## 4 结 论

本文采用三组不同形式的散热器对比研究了铝翅片和泡沫金属铜对石蜡储热性能和散热性能的增强作用, 实验发现:

1) 加装铝翅片和填充泡沫金属铜能降低热源与石蜡的平均温差, 幅度分别为 76%和 18%, 同时使储热阶段热源的平均温度降低  $22.2^\circ\text{C}$  和  $9.5^\circ\text{C}$ , 加装翅片增强石蜡储热性能强于填充泡沫金属铜; 并且在高功率电子元器件中, 更适合采用加装翅片的方式增强石蜡的储热性能;

2) 加装翅片和填充泡沫金属铜引起的体积增加

导致整体储热密度分别减少 40.3%和 4.2%; 从储热密度方面考虑, 泡沫金属铜的明显优于翅片。综上所述, 我们需要综合考虑翅片和泡沫金属铜对储热性能和储热密度的作用, 从而选择最经济、最适用的增强石蜡导热性能的方法。

## 参 考 文 献

- [1] HU Jinyan, HU Run, ZHU Yongming, et al. Experimental Investigation on Composite Phase Change Material (CPCM) Based Substrate [J]. Heat Transfer Engineering, 2016, 37(3/4): 351-358
- [2] ZHANG Zhengguo, FANG Xiaoming. Study on Paraffin/Expanded Graphite Composite Phase Change Thermal Energy Storage Material [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(3): 303-310
- [3] Ai D S, Su L, Gao Z, Deng C S, et al. Study of ZrO<sub>2</sub> Nano Powders Based Stearic Acid Phase Change Materials [J]. Particuology, 2010, 8(4): 394-397
- [4] Howard J A, Walsh P A. An Experimental Investigation of Heat Transfer Enhancement Mechanisms in Microencapsulated Phase-Change Material Slurry Flows [J]. Heat Transfer Engineering, 2013, 34(2-3): 223-234
- [5] 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
- [6] Parlak M, ETiz U. Thermal Management of an Electronic Device Using PCM Embedded in a Pin Fin Heat Sink [C]// Proceeding of 12<sup>th</sup> Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Las Vegas, NV, 2010: 1-7
- [7] STriTih U. An Experimental Study of Enhanced Heat Transfer in Rectangular Thermal Storage Phase Change Material [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(12/13): 2841-2847
- [8] 张涛, 余建祖. 相变装置中填充泡沫金属的传热强化分析 [J]. 制冷学报, 2007, 28(6): 13-17  
ZHANG Tao, YU Jianzu. Analysis on Thermal Conductivity Enhancement for PCM Embedded in Metal Foam [J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(6): 13-17