

# 石蜡/膨胀石墨储热基板的实验研究

胡锦涛 付星 罗小兵

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 本文提出了一种应用于大功率电子器件散热的相变储热基板, 制备了用于相变储热基板的石蜡/膨胀石墨复合相变材料, 并通过实验对相变储热基板的储热性能进行验证。结果表明, 相变储热基板实验储热量和理论储热量吻合较好, 约占热源产生热量的 32%, 该相变储热基板可以通过延长散热时间, 降低基板单位时间散热负荷, 同时降低热源和基板的升温速率。

**关键词** 相变储热基板; 石蜡/膨胀石墨; 差示扫描量热仪 (DSC)

**中图分类号:** TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2013)08-1511-04

## Experimental Study of Paraffin/Expanded Graphite Based Heat Storage Substrate

HU Jin-Yan FU Xing LUO Xiao-Bing

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

**Abstract** In this paper, a phase change heat storage substrate for cooling high-power electronic devices was proposed and the paraffin/expanded graphite composite phase change material was used in the heat storage substrate. The heat storage performance of the substrate was examined experimentally. The results show that the experimental heat storage of the substrate is consistent with the theoretical heat storage and the ratio between the heat stored in the substrate and the heat generated by the heat source is about 32%. When the time elapses, the heat dissipation load of the unit time reduces. Furthermore, the temperature rising rates of the heat source and the substrate diminish.

**Key words** phase change heat storage substrate; paraffin/expanded graphite; differential scanning calorimetry

## 0 前言

随着电子技术的快速发展, 电子器件集成度日益升高, 热流密度急剧增加, 电子器件的散热问题成为限制其进一步发展的瓶颈。在实际工作中, 部分大功率电子器件间歇性工作, 其单次工作持续时间短, 但产生的热流量大。针对此种间歇性工作电子器件的散热装置, 其工作特性为在电子器件产热时高强度工作, 而在其余时间其散热性能并未得到有效利用。

相变储热技术经过长期发展已经广泛应用到工业废热及余热的回收利用, 太阳能储热以及建筑冷暖空调节能等领域<sup>[1,2]</sup>。因此诸多学者对相变材料进行了研究, 目前研究比较多的相变储热材料主要有无机盐水合物、有机物及其混合物等<sup>[3]</sup>。其中石蜡因为其过冷度比较小、储热密度大、性质稳定等优点, 被广泛应用于中低温潜热储热<sup>[4,5]</sup>。但是石蜡

的导热系数比较低, 必须通过增加导热材料来改善导热性能。目前主要强化方法包括在石蜡中添加具有高导热系数的泡沫铜、泡沫铝<sup>[5]</sup>, 以及在石蜡中添加高导热率的膨胀石墨<sup>[6]</sup>等。由于膨胀石墨比表面积大、吸附性好, 将液态石蜡与其充分混合搅拌后, 石蜡可以很好地进入到膨胀石墨微孔道结构中, 形成致密的石蜡/膨胀石墨复合相变储热材料, 从而提高复合相变储热材料的导热系数<sup>[7]</sup>。

基于大功率电子器件间歇性的工作特点及相变储热材料的储热特性, 我们<sup>[8]</sup>提出利用潜热型相变材料制成基板对热源产生的部分热量进行储存, 储存的热量在热源停止工作时散出。通过实现产热与放热的非同步进行的方式, 延长散热时间, 降低散热难度和散热成本, 为解决大功率电子器件高效散

收稿日期: 2012-12-28; 修订日期: 2013-07-23

基金项目: 国家 973 资助项目 (No.2011CB013105)

作者简介: 胡锦涛 (1988-), 男, 博士研究生, 主要从事相变储热基板研究。通信作者: 罗小兵, 教授, Luoxb@mail.hust.edu.cn.

热问题提供一种可能的途径。本文利用自行制备的石蜡/膨胀石墨复合相变材料<sup>[4]</sup>作为相变储热材料,研制了该种储热基板。应用差示扫描量热仪(DSC)对石蜡及复合材料储热性能进行测试,并模拟储热基板应用于大功率电子器件工作,进行实验,对其储热性能进行了验证和分析。

## 1 石蜡/膨胀石墨复合相变材料的制备

石蜡/膨胀石墨复合相变材料的制备原料为切片石蜡和可膨胀石墨。可膨胀石墨物性参数为:膨胀倍率 200 mL/g, 粒度 50 目, 膨胀温度高于 900°C。切片石蜡其相变温度为 56~58°C。首先将可膨胀石墨放置于 70°C 真空干燥箱中进行干燥处理, 然后将其送入 900°C 马弗炉中进行受热膨胀 40~50 s 即可得到膨胀石墨。其次将切片石蜡放于不锈钢容器中并送入 80°C 烤箱中进行加热融化。待石蜡融化后, 分别按照石蜡质量百分比为 95% 和 85% 的比例将膨胀石墨加入到液态石蜡中, 对液态石蜡进行吸附。整个吸附过程均在 80°C 的烤箱中进行, 并不断搅拌直至石蜡和膨胀石墨充分混合吸附。

## 2 石蜡及复合材料的 DSC 测试

为得到石蜡及复合材料的理论储热量, 对其进行了 DSC 测试。图 1 是切片石蜡的 DSC 曲线图, 从图中可以看出石蜡相变是个持续升温的过程, 并且在融化过程中存在两个明显的相变峰, 分别代表石蜡融化的两个过程。随着温度的升高, 石蜡在 32.91°C 首先发生的是固-固的相变软化过程, 即第一相变过程, 并在 39.23°C 时热流达到最大值。随着温度继续升高, 石蜡在 51.55°C 时发生的是固-液相变过程, 即第二相变过程, 并在 56.60°C 时达到最大热流。从图中可以看出, 在温度为 59.14°C 时相变过程结束。石蜡相变的吸热量为两个相变过程吸收的热量  $H_1$ 、 $H_2$  之和, 为 180.30 J/g。

图 2 是石蜡质量分数为 85% 的石蜡/膨胀石墨复合相变储热材料的 DSC 曲线图。从该图可以看出该复合材料的相变同样经历固-固相变和固-液相变过程, 相变潜热为 153.65 J/g, 近似为切片石蜡相变潜热 180.30 J/g 的 85%。对比图 2 和图 1, 可以看出复合材料各相变过程的相变温度和切片石蜡相变过程的相变温度几乎一致。由此说明, 膨胀石墨的加入不会影响石蜡的相变过程以及潜热大小。根据图 1 和图 2 的结果, 为了增强复合材料的储热量, 在后续的实验, 我们提高石蜡在复合材料中的质量比

为 95%, 即石蜡为 266 g, 膨胀石墨为 14 g。

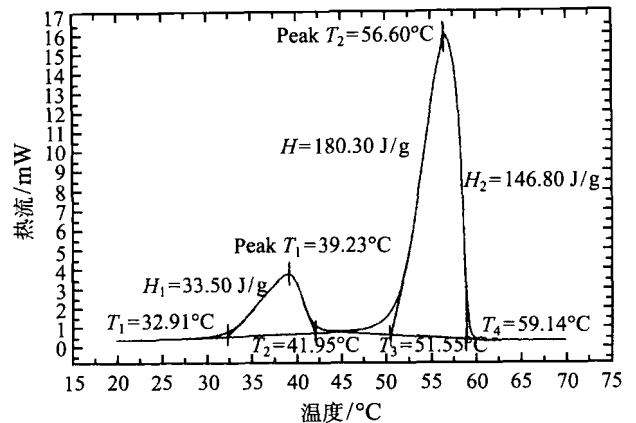


图 1 石蜡 DSC 曲线

Fig. 1 The DSC curves of paraffin

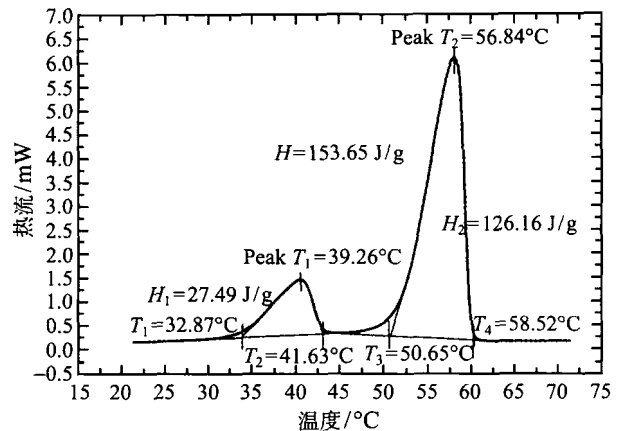


图 2 复合相变材料 DSC 曲线

Fig. 2 The DSC curves of the composite phase change material

## 3 相变储热基板的储热实验

### 3.1 实验装置及实验方法

实验研究了在绝热条件即通过保温棉对基板四周进行保温隔热(工况一)和非绝热条件(工况二)两种工况条件下相变储热基板的工作性能, 实验装置如图 3 所示。复合材料储存于铝合金基板内, 基板尺寸为 108 mm×88 mm×54 mm, 厚度 4 mm, 质量 0.541 kg。基板与盖板通过螺钉及 O 型密封圈进行密封。通电后, 储热基板通过布置在基板底部中心位置的热源进行加热, 热源的尺寸为 50 mm×70 mm×20 mm, 质量为 0.53 kg。热源的输出功率通过调压器进行调节。热源、基板及基板外保温棉表面的温度通过 K 型热电偶测得, 热电偶具体分布图如图 3 及图 4 所示。各测点温度通过数据采集仪进行实时采集并送入计算机中进行存储、处理和分析。

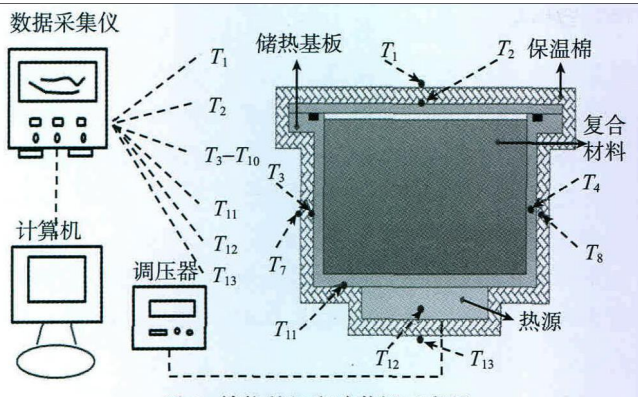


图 3 储热基板实验装置示意图

Fig. 3 Schematic view of the experimental setup

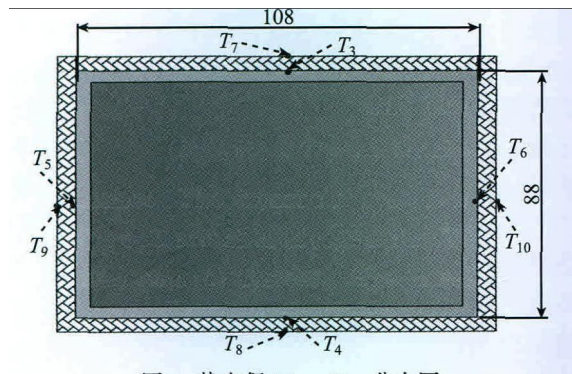


图 4 热电偶  $T_3 \sim T_{10}$  分布图

Fig. 4 The distribution of thermocouples  $T_3 \sim T_{10}$

### 3.2 实验结果及分析

#### 3.2.1 绝热工况下实验结果及分析

工况一中, 热源功率  $P$  为 5 W, 实验中保温层尺寸为  $180 \text{ mm} \times 170 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ , 保证足够好的保温效果。实验中各热电偶的实验数据曲线如图 5 所示, 其中基板四周热电偶  $T_3 \sim T_6$ , 以及保温棉四周热电偶  $T_7 \sim T_{10}$  因为温差很小, 故壁面温度分别取其平均值。实验中环境温度  $T_\infty$  为  $26^\circ\text{C}$ , 并且整个实验装置处于大空间自然对流换热环境中。

由图 5 可以看出, 基板各面及热源温度曲线在时间为 4 h 和 9.33 h 时出现两个转折点, 在这两个转折点热源温度  $T_{12}$  分别为  $54^\circ\text{C}$  和  $61^\circ\text{C}$ , 基板四周温度分别近似为  $52^\circ\text{C}$  和  $59^\circ\text{C}$ 。并且两转折点将升温过程分为第一升温过程、第二升温过程以及第三升温过程。温度曲线在第二升温过程斜率有明显

降低, 期间热源及基板四周温升  $\Delta T$  都为  $7^\circ\text{C}$ 。在第三升温过程, 热源及基板四周温度曲线上升斜率重新恢复到比较大的状态。由此说明石蜡石墨复合相变材料可以很好储热, 并且储热过程主要发生在石蜡相变的第二过程, 这与石蜡及复合材料的 DSC 测试结果是吻合的。

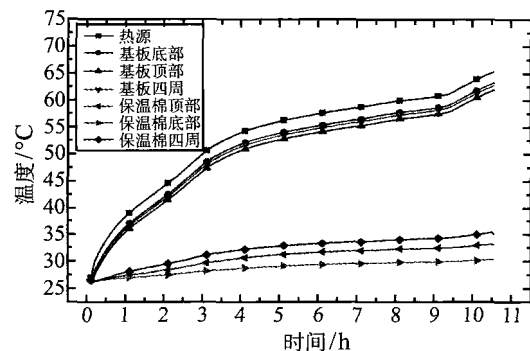


图 5 工况一下各测点温度示意图

Fig. 5 Temperature curves of the experiment under the first working condition

为了求得实验中石蜡/膨胀石墨复合相变材料的储热量, 相变材料相变过程中的系统热量进行了核算。在对保温棉与空间自然对流换热求取中, 对流换热系数  $h$  的求解近似采用大空间自然对流的经验公式:

$$Nu = \frac{hl}{\lambda} = c(Gr \cdot Pr)^n \quad (1)$$

其中  $Pr$  为普朗特数,  $l$  为特征长度,  $Nu$  为努塞尔数,  $Gr$  为格拉晓夫数:

$$Gr = \frac{g\beta\theta_w L^3}{\nu^2} \quad (2)$$

对于保温棉四周, 公式 (1) 中  $c$  取 0.59,  $n$  取 0.25; 对于保温棉底部,  $c$  取 0.27,  $n$  取 0.25; 对于保温棉顶部,  $c$  取 0.54,  $n$  取 0.25。公式 (2) 中,  $g$  取  $9.8 \text{ g/m}^2$ ,  $\beta$  取 0.0033。并在对对流热量求取时, 近似将每个升温阶段当做恒壁温处理, 壁温定义为各个阶段的起始温度和结束温度的平均值。并根据保温棉各面温度情况得到各个温度阶段的物性参数及结合公式 (1)、(2) 得到各阶段近似等效对流换热系数  $h$  如表格 1 所示。

表 1 保温棉各升温阶段对应干空气物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of the surfaces of the insulation cotton

物性参数	$L/\text{m}$	$t_w/^\circ\text{C}$	$\theta_w/^\circ\text{C}$	$t_m/^\circ\text{C}$	$\lambda/10^{-2} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\nu/10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$	$Pr$	$h/\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
保温棉 阶段一	0.15	29.25	3.25	27.63	2.65	15.76	0.701	3.31
四周 阶段二	0.15	33	7	29.5	2.67	16	0.701	4.01
保温棉 阶段一	0.175	28.25	2.25	27.13	2.64	15.71	0.701	2.66
顶部 阶段二	0.175	31	5	28.5	2.66	15.85	0.701	3.24
保温棉 阶段一	0.175	27	1	26.5	2.64	25.60	0.702	1.08
底部 阶段二	0.175	29	3	27.5	2.85	15.81	0.701	1.43

根据牛顿冷却公式计算得到保温棉两个阶段各个面的散热量  $Q_{\text{con}}$ :

$$\Phi = Ah\Delta T \quad (3)$$

$$Q_{\text{con}} = \Phi \times \Delta t \quad (4)$$

由式(3)、(4)得到保温棉各个升温阶段的散热量及总散热量  $Q_{\text{con}}$ 。并由公式(5)可得热源输入热量  $Q_{\text{in}}$ :

$$Q_{\text{in}} = P \times \Delta t \quad (5)$$

基板及热源自身的升温吸热热量  $Q$  为:

$$Q = C_p m \Delta T \quad (6)$$

其中基板腔体  $C_p$  为 871 J/(kg·K), 热源模块  $C_p$  为 470 J/(kg·K), 由式(6)得到基板腔体升温吸热  $Q_{\text{sink}}$  及热源升温吸热  $Q_{\text{heat}}$ 。且由能量守恒可以计算得到复合相变材料实验储热量:

$$Q_{\text{store}}^{\text{exp}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{sink}} - Q_{\text{heat}} - Q_{\text{con}} \quad (7)$$

由此得到实验储热量为 55773.80 J。而复合材料的理论储热量的计算包括相变前的显热储热量以及相变过程中的潜热吸热量:

$$Q_{\text{store}}^{\text{the}} = m_{\text{pra}} \times ((T_1 - T_{\infty}) \times C_p^{\text{pra}} + H) + m_{\text{gra}} \times (T_4 - T_{\infty}) \times C_p^{\text{gra}} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{|Q_{\text{store}}^{\text{exp}} - Q_{\text{store}}^{\text{the}}|}{Q_{\text{store}}^{\text{the}}} \quad (9)$$

其中  $T_1$  及  $T_4$  分别为石蜡 DSC 曲线中石蜡融化开始和融化结束时的温度,  $C_p^{\text{pra}}$  及  $C_p^{\text{gra}}$  分别为石蜡和膨胀石墨的比热容, 其值分别为 2.7 J/g 和 0.71 J/g,  $m_{\text{pra}}$  和  $m_{\text{gra}}$  分别为石蜡及膨胀石墨质量。由此可根据式(8)得到理论储热量为 54697.59 J。由式(7)得到的实验储热量为 55773.80 J, 占热源输入热量的 33.20%。通过式(9), 可得出实验误差为 1.96%。

### 3.2.2 非绝热工况下实验结果及分析

在工况二中, 热源的加热功率增加为 15 W, 基

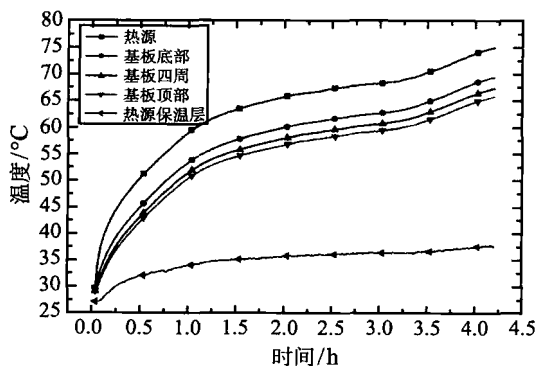


图 6 工况二下各测点温度示意图

Fig. 6 Temperature curves of the experiment under the second working condition

板各面的温升曲线如图 6 所示, 从图 6 可以看出热源及基板各面的温升曲线与工况一条件下有相同的趋势, 并且从图 6 中可以同样读取基板各面温升曲线的各转折点温度。采用前述方法, 我们对工况二下的相变储热基板同样进行了热量核算。得到  $Q_{\text{con}}$  为 96836.37 J,  $Q_{\text{in}}$  为 18000 J,  $Q_{\text{heat}}$  及  $Q_{\text{sink}}$  分别为 10086.65 J 和 15541.34 J。相变复合材料的实验储热量为 57535.64 J, 占热源输入热量的 31.96%。通过公式(9), 得出实验误差为 5.20%。

## 4 结 论

本文结合石蜡/膨胀石墨复合相变材料的相变性质制备一种相变储热基板, 并对石蜡质量分数为 95% 的复合材料储热基板的储热性能进行了验证, 发现其理论储热量与实验储热量吻合良好, 在工况一及工况二中, 实验误差分别为 1.96% 和 5.20%。储热基板可以有效地储存热量, 储热量占热源输入热量的 32% 左右。此种基板通过降低单位时间散热负荷, 减小热源及基板升温速率, 抑制热源温度过高, 为有效解决大功率电子器件封装中散热问题提供了一种思路和方法。

## 参 考 文 献

- [1] Zalba B, Marin J M, Cabeza L F. Review on Thermal Energy Storage With Phase Change: Material, Heat Transfer Analysis and Applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23: 251-283
- [2] Cui H T, Yuan X G, Hou X B. Research on and Application of the Thermal Energy Storage [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2002, 21(1): 23
- [3] Mohammed M F, Amar M K. A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45: 1597-1615
- [4] Zhang Z G, Fang X M. Study on Paraffin/Expanded Graphite Composite Phase Change Thermal Energy Storage Material [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47: 303-310
- [5] Mettawee E S, Assassa G M R. Thermal Conductivity Enhancement in a Latent Heat Storage System [J]. Solar Energy, 2007, 81: 839-845
- [6] Py X, Olives S, Mauran S, Paraffin/Porous Graphite Matrix Composite as a High and Constant Power Thermal Storage Material [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2001, 44: 2727-2737
- [7] Andrew M, Mohammed F, Selman J R et al. Thermal Conductivity Enhancement of Phase Change Materials Using a Graphite Matrix [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26: 1652-1661
- [8] 罗小兵, 付星, 胡锦涛. 利用潜热型功能流体的散热装置及其散热方法: 中国发明专利, 201110432260.2 [P]. 2012-07-04
- Luo X B, Fu X, Hu J Y. A Heat Sink Based on the Thermal Latent Functional Fluid and its Working Method: China Patent Application Number, 201110432260.2 [P]. 2012-07-04