

文章编号:1000-8055(2012)04-0854-07

# 翅片-泡沫铜复合结构的导热增强作用

迟蓬涛, 高红霞, 余建祖, 谢永奇

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

**摘 要:** 由于翅片能够极大提高沿翅片伸展方向的导热能力, 因此为满足一些航空大功率元件的散热要求, 提出采用翅片-泡沫铜复合结构作为导热增强介质的概念. 制作了翅片厚度分别为 0.5、0.8 mm 和 1.0 mm 的翅片-泡沫铜/石蜡实验件. 通过瞬态和稳态的方法对实验件的热特性进行了测试. 结果表明添加 1.0 mm 翅片后复合材料的等效导热系数达到  $11.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 分别为泡沫铜/石蜡和纯石蜡的 3.7 倍和 42.2 倍; 在相同热流密度下, 采用翅片的装置热源与散热面的最大温差相对于未采用翅片的装置降低了 73.2%~90.0%. 实验证明翅片能够显著提高泡沫铜/石蜡的等效导热系数和动态热响应速度. 根据实验结果提出了适用于翅片-泡沫铜/石蜡相变过程的无量纲数关联式.

**关 键 词:** 泡沫铜; 翅片; 石蜡; 相变材料; 传热

**中图分类号:** V231.1; TK021

**文献标志码:** A

## Heat transfer enhancement of fin-copper foam composite structure

CHI Peng-tao, GAO Hong-xia, YU Jian-zu, XIE Yong-qi

(School of Aeronautic Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** As the fins can significantly enhance the thermal conducting capability along the fin extending direction, the concept of combining fins with copper foam as thermal conductivity enhancer was proposed to satisfy the heat rejection requirements of some high-power electronic components used in the aviation. Fin-copper foam/paraffin samples with fin thicknesses of 0.5, 0.8 and 1.0 mm were processed. The thermal performances of the samples were tested via steady and transient experiments. The results suggest that the effective conductivity of composite material with 1.0 mm fin reaches  $11.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , which is 3.7 times as that of the copper foam/paraffin and 42.2 times as that of the pure paraffin. Under the same heat flux, the maximum temperature differences of the samples with fins are reduced by 73.2%—90.0%. The tests verify that the effective thermal conductivity and the dynamic thermal response of copper foam/paraffin can be remarkably enhanced by fins. A correlation of the non-dimensional coefficients is raised via the experimental results.

**Key words:** copper foam; fin; paraffin; phase change material; heat transfer

随着现代光电技术的进步, 应用于航空领域的电子设备集成度越来越高, 发热量也日益增大, 一些电子系统的短时峰值发热量大大超过平均发热量, 航空电子设备的散热问题日益严峻. 由于相

变材料具有恒定的相变温度和巨大的相变潜热, 因此可用来解决这类电子设备的散热问题. 但由于传统相变材料自身的导热系数非常低, 因此需要在其中加入导热增强介质以改善其传热性能.

收稿日期: 2011-12-20; 修订日期: 2012-02-21

基金项目: 航空科学基金(2004ZE51048); 凡舟青年科研基金(20070505)

作者简介: 迟蓬涛(1984—), 男, 山东蓬莱人, 博士生, 主要从事相变储能和电子设备热设计研究.

自上世纪80年代以来,国内外很多学者对导热增强介质的选择进行了研究,其中最常见的是泡沫金属<sup>[1-5]</sup>和翅片<sup>[6-11]</sup>。他们的研究表明泡沫金属能够显著提高纯相变材料的导热系数,而翅片也能够极大地促进沿翅片伸展方向的换热能力。但对于一些超大功率的航空电子元件来说,仅仅依靠泡沫金属或翅片的导热增强作用仍不能达到温控或散热的要求。由于金属翅片能极大提高复合材料沿翅片方向上的导热能力,而泡沫金属复合材料在各个方向上都具有相对较好的热扩散能力,因此本文提出将少量铜翅片嵌入泡沫铜,而后与石蜡结合形成翅片-泡沫铜/石蜡的复合结构。这种复合结构利用铜翅片较强的导热能力将热量从热源不断导出,热量沿翅片传递的过程中又不断通过泡沫铜金属纤维和节点构成的传热网络扩散到整个储能装置中并被相变材料所吸收,由此获得热性能更加优异的相变储能装置。

## 1 导热模型

当热流方向与平直翅片伸展方向平行时,翅片与泡沫铜/石蜡形成并联关系,此时复合材料的等效导热系数最大,如图1所示。

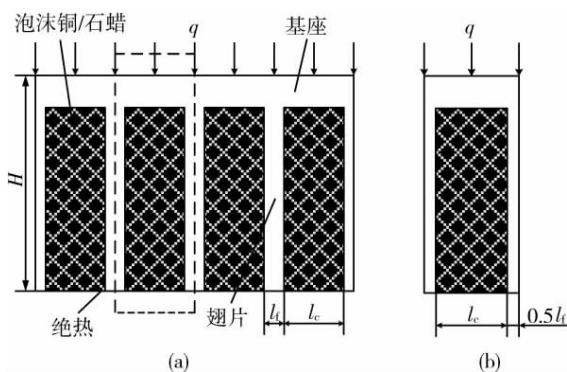


图1 翅片和泡沫铜/石蜡并联结构示意图

Fig. 1 Parallel model of fins and copper foam/paraffin

图1(a)中白色部分代表铜基座和焊接在其上的铜翅片,灰色部分代表泡沫铜/石蜡结构。实验件顶部基座施加有恒定热流密度 $q$ ,其方向与翅片伸展方向平行,其余3个边界均为绝热条件。根据对称性,可选择图1(b)所示的结构作为传热单元,根据局部热平衡假设可得到翅片-泡沫铜/石蜡复合材料的最大等效导热系数 $\lambda_{\text{eff}}$ 为

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\lambda_f l_f}{l_c + l_f} + \frac{\lambda_c l_c}{l_c + l_f} \quad (1)$$

式中下标“f”和“c”分别表示铜翅片和泡沫铜/石蜡结构的等效物性参数, $l$ 和 $\lambda$ 分别为厚度和导热系数。

## 2 翅片-泡沫铜/石蜡温升实验

在前述导热模型的基础上,对翅片-泡沫金属相变储能装置的储能特性进行了实验研究,以孔隙率 $\epsilon=97.20\%$ 的泡沫铜与3种不同厚度(0.5, 0.8 mm和1.0 mm)的铜翅片相结合,制作了翅片-泡沫铜/石蜡相变储能实验样件,对其在不同功率密度下的瞬态储热性能进行了测试,并通过稳态测量得到各个实验件的等效导热系数。为了与不含翅片的实验件进行对比,同时制作了孔隙率相同的泡沫铜/石蜡实验样件并进行了测试。

### 2.1 实验件结构

实验材料主要包括石蜡、泡沫铜、铜翅片和酚醛树脂板。其中石蜡的熔点 $t_m$ 为 $36.8^\circ\text{C}$ ,熔化潜热 $L_c$ 为 $241\text{ kJ/kg}$ ;泡沫铜的孔隙率 $\epsilon$ 为 $97.20\%$ ,孔径为 $1\sim 1.5\text{ mm}$ 。酚醛树脂板具有较高的强度和绝热性,且不易被烷烃类有机相变材料渗透,因此用来作为储能装置的封装材料。

将泡沫铜进行线切割,加工成尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 的长方体,并在其内部为翅片预留空间,翅片间距 $(l_f + l_c)$ 为 $12.5\text{ mm}$ ,每个芯体内部等距布置8条厚度相同的翅片,翅片表面涂导热胶与泡沫铜粘接构成翅片-泡沫铜芯体。为了减小接触热阻,翅片-泡沫铜芯体与铜基座和铜底板通过软钎焊加工成“三明治”结构,如图2(a)所示。用酚醛树脂绝热板对芯体进行封装,并采用真空灌注的方式将石蜡填充到实验件内部,而后对实验件进行密封,完成实验件的制作。为了防止实验中出现过大膨胀应力,灌注过程中系统的温度控制在 $55^\circ\text{C}$ 。灌注并密封后的实验样件外观如图2(b)所示。

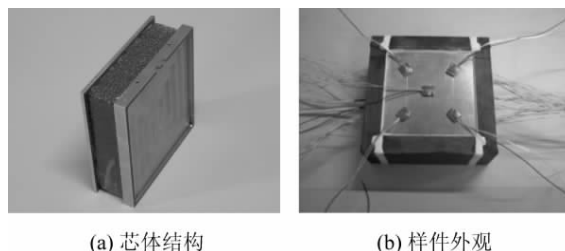


图2 实验件芯体和外观结构

Fig. 2 Core and the appearance of the sample

为测量储能装置内部温度变化,将实验件芯体沿厚度方向分为 5 个测温层,共布置 25 个铂电阻. 实验件芯体结构及测温点布置示意图如图 3 所示.

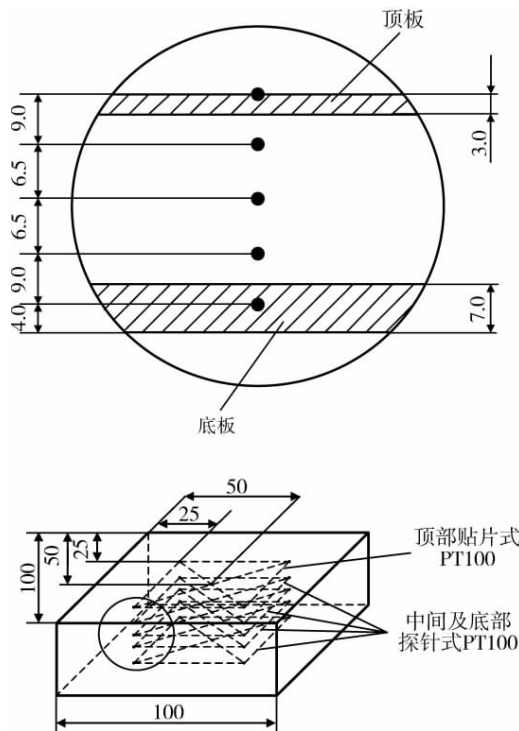


图 3 实验件测温点布置示意图(单位:mm)  
Fig. 3 Distribution of the temperature sensors  
(unit:mm)

2.2 实验设备

实验设备主要包括数据采集仪、直流稳压稳流电源和恒温箱等. 数据采集仪用来记录并转换铂电阻测得的温度数据; 电源为实验样件提供一定的热流密度; 恒温箱为实验提供恒定的温度环境. 实验件除基座有热流输入外,其他面均包裹足够厚度的保温棉后放入恒温箱中. 整个实验台如图 4 所示.

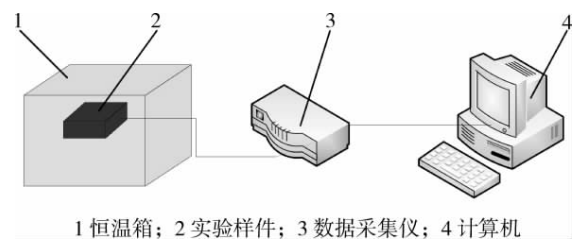


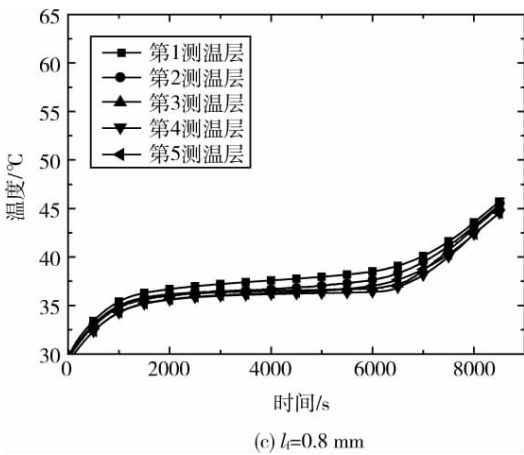
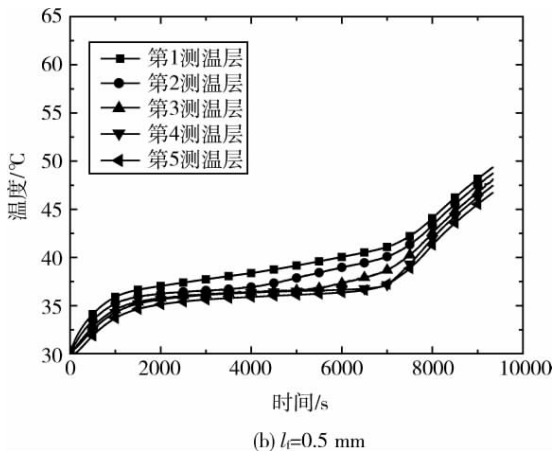
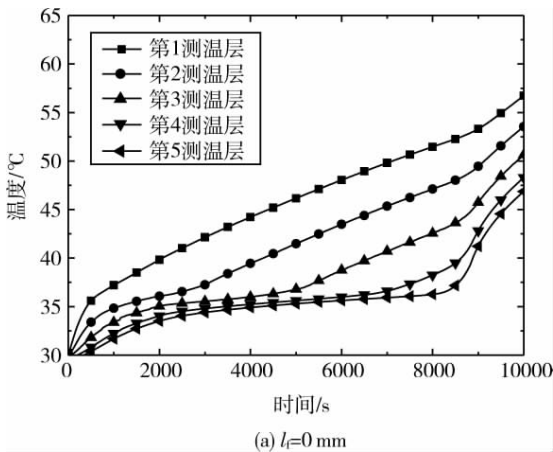
图 4 实验台测试图  
Fig. 4 Test bed

2.3 瞬态测试结果及分析

为了测试并比较不同厚度翅片-泡沫铜复合

相变装置的储能效果,分别对添加 3 种厚度翅片以及无翅片的实验件在热流密度 1 000, 1 500 W/m<sup>2</sup>和 2 000 W/m<sup>2</sup> 下的瞬态储能过程进行了测试,实验件初始温度及环境温度均为(30±0.5)℃,得到各样件内部温度变化如图 5~图 7 所示,其中  $l_f=0$  mm 即表示未填充翅片的泡沫铜/石蜡储能实验件的测试结果.

由图 5~图 7 可知,随着翅片厚度的增加,装置基座的温升被更好地抑制,相同热流密度下的储能时间缩短,储能效率提高,说明翅片-泡沫铜/石蜡复合材料的等效导热系数随翅片厚度的增加



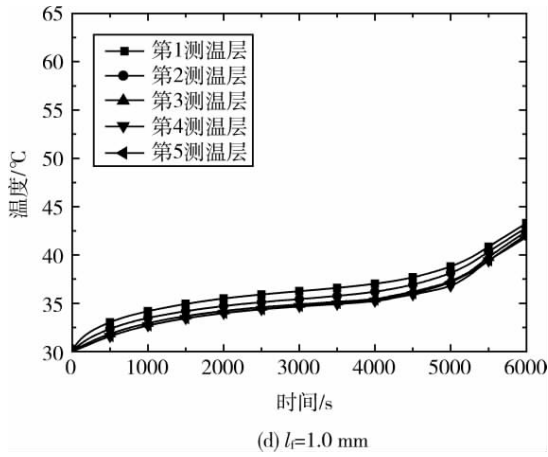


图5 1000 W/m<sup>2</sup> 热流密度下的温升曲线

Fig. 5 Temperature-time curves under 1000 W/m<sup>2</sup>

而升高,且随着翅片厚度的增加,翅片-泡沫铜/石蜡复合结构储能过程中逐层熔化的形式也被逐渐削弱,各层之间熔化的温度拐点已难以区分.当翅片厚度达到  $l_f=1.0$  mm 时,装置内各测温层已没有明显的相变结束温度拐点,所有测温层的相变过程趋于一致,如图 5(d)~图 7(d)所示.此现象表明:当翅片达到一定厚度时,底面热量首先会沿翅片快速传导,而后通过泡沫铜构成的传热网络

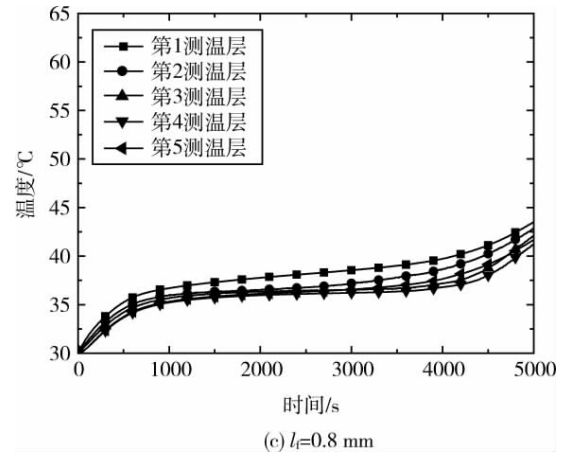


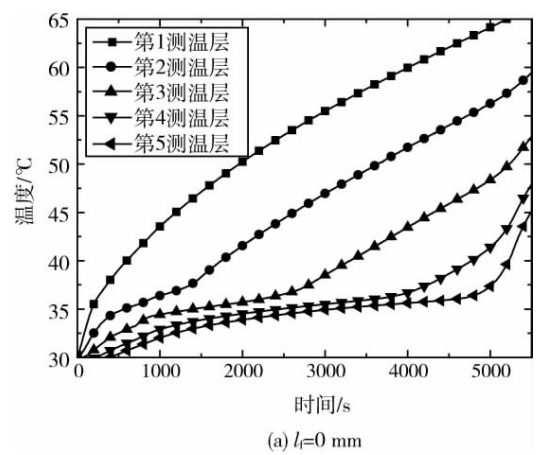
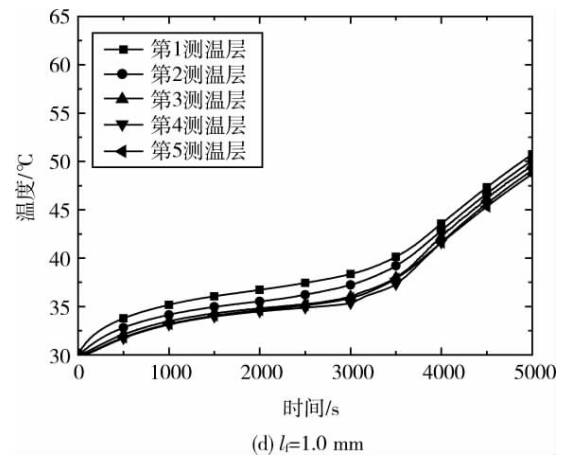
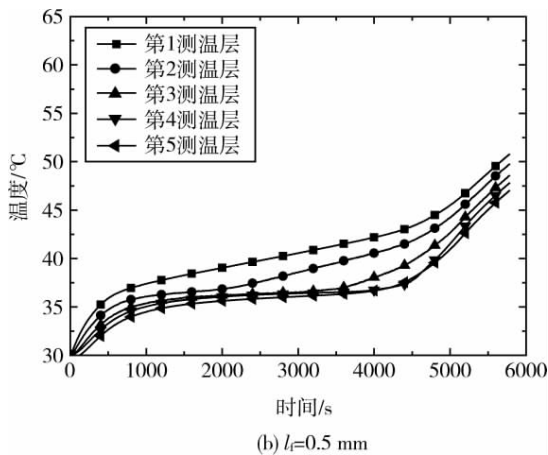
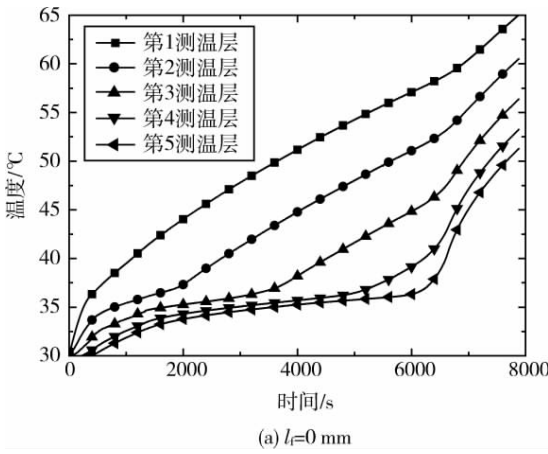
图6 1500 W/m<sup>2</sup> 热流密度下的温升曲线

Fig. 6 Temperature-time curves under 1500 W/m<sup>2</sup>

快速向整个装置内扩散,储能过程基本是在整个装置内部同时进行.

加入金属翅片后各实验件基座和底板之间温差随时间的变化如图 8 所示.

由图 8 可知,基座-底板温差随着熔化过程的开始而逐渐增大,并在相变结束时达到最大;而后随着相变过程的结束,最大温差又逐渐减小,最后趋于一个稳定值.这是因为当相变开始时,位于



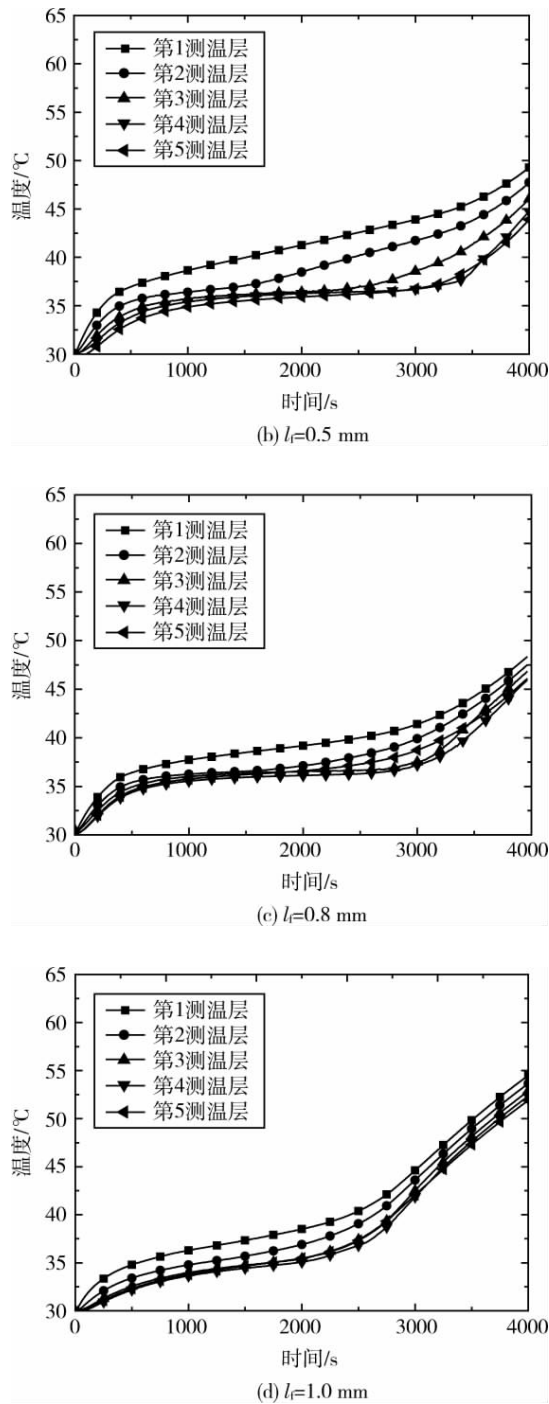


图 7 2000 W/m² 热流密度下的温升曲线

Fig. 7 Temperature-time curves under 2000 W/m²

固-液界面以上的相变材料已经熔化,进入显热吸热阶段,温度迅速升高,而位于固-液界面以下的相变材料仍处于恒温吸热过程,因此随着相变过程的进行,装置基座-底板的温差越来越大.相变结束后,整个装置进入显热温升阶段,此时由于翅片-泡沫铜的导热增强作用以及液态相变材料的对流换热<sup>[12]</sup>,装置基座-底板的温差迅速减小.

由图 8 可知,不论选用何种厚度的翅片,装置基座-底板的温差均随着加热功率的增大而升高,

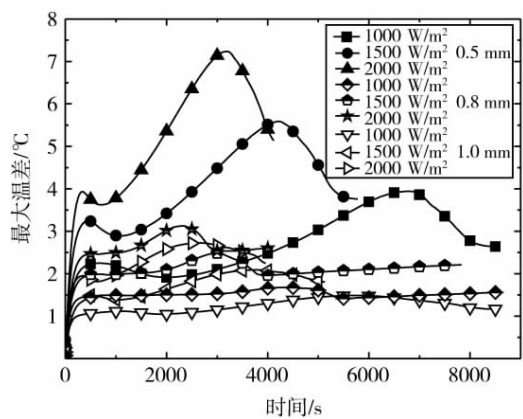


图 8 基座-底板温差随时间的变化

Fig. 8 Temperature difference between the base and the bottom plate

这是因为热流密度增加时,固-液界面上部的已熔相变材料温升更快,而固-液界面下部的未熔化相变材料仍然保持在相变温度的缘故.当热流密度一定时,装置基座-底板温差随着翅片厚度的增加而减小,当翅片厚度为 0.8 mm 和 1.0 mm 时,温差-时间曲线已经没有明显的峰值.

由实验数据可知,未加翅片的装置基座-底板的最大温差在 1000 W/m² 的热流密度下为 15.36℃, 1500 W/m² 为 20.9℃, 2000 W/m² 为 27.0℃,采用翅片的装置基座-底板的最大温差相对于未加翅片装置降低了 73.2%~90.0%,说明铜翅片和泡沫铜所形成的主干加网状导热结构使得翅片-泡沫铜/石蜡复合结构的储能性能明显优于泡沫铜/石蜡复合结构.

#### 2.4 等效导热系数

实验中对加热达到稳态时装置内部的温差进行了测量,通过傅里叶定律得出实验件沿翅片高度方向的等效导热系数.

为获得装置的等效导热系数,需测量一定热流密度下装置达到热平衡时的温差.实验中对  $q=500\text{ W/m}^2$ ,  $q=1000\text{ W/m}^2$ ,  $q=1500\text{ W/m}^2$  以及  $q=2000\text{ W/m}^2$  4 种加热功率下达到稳定状态后的基座-底板温差进行了测量,为减小误差,每种加热功率各进行 3 次测量,其结果如图 9 所示.

则根据傅里叶定律,有

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\sum_{i=1}^{12} \frac{q_i \delta}{\Delta t_i}}{12} \quad (2)$$

式中  $\delta=31\text{ mm}$  为基座-底板之间的距离,  $\Delta t_i$  为基座-底板温差.由式(2)可得无翅片和 3 种翅片厚度下的复合储能装置等效导热系数分别为

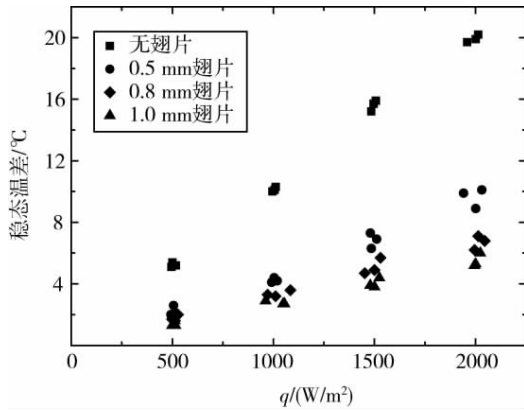


图 9 不同功率下、不同翅片厚度装置的  
基座-底板温差

Fig. 9 Base-bottom temperature difference  
under different power densities

3.03, 6.89, 9.31 W/(m·K) 和 11.4 W/(m·K). 由测量结果可知:添加翅片后芯体的导热系数得到了很大的提高,其值随着翅片厚度的增加而增大,添加 1.0 mm 翅片的实验件的导热系数达到无翅片实验件的 3.7 倍,更为纯石蜡导热系数 (0.27 W/(m·K)) 的 42.2 倍.

## 2.5 无量纲传热因子

根据参考文献[6],可引入以下无量纲传热因子

$$Nu = \frac{q}{\Delta t_b} \cdot \frac{l_c/2}{\lambda_c} \quad (3)$$

$$Fo = \frac{\alpha_c \tau}{(l_c/2)^2} \quad (4)$$

$$St = \frac{q(c_p)_c(l_c/2)}{\lambda_c L_c} \quad (5)$$

$$Ra = \frac{g\beta\rho_c^2 c_{pc} q (l_c/2)^4}{\lambda_c^2 \mu} \quad (6)$$

式(3)中,努塞尔数反映了热流密度  $q$ , 温差  $\Delta t_b$ ,  $l_c$  和  $\lambda_c$  之间的关系.  $\Delta t_b$  为基座温度  $t_b$  与  $t_m$  的温度差. 特征长度选择为泡沫铜/石蜡结构长度的一半,即  $l_c/2$ .  $\tau$  为时间,  $\alpha_c$  为泡沫铜/石蜡的热扩散率,  $\rho_c$  和  $c_{pc}$  可由下式计算得到

$$\rho_c = \epsilon \cdot \rho_p + (1 - \epsilon) \rho_{Cu} \quad (7)$$

$$c_{pc} = \frac{\epsilon(\rho c_p)_p + (1 - \epsilon)(\rho c_p)_{Cu}}{\epsilon \rho_p + (1 - \epsilon) \rho_{Cu}} \quad (8)$$

式中下标“p”和“Cu”分别代表石蜡和泡沫铜的物性参数.  $g$  为重力加速度,  $\beta$  和  $\mu$  分别为石蜡的体积膨胀率和动力黏度,其值为 0.94 和  $42.9 \times 10^{-6}$  kg/(m·s). 底座和翅片材料均为黄铜,其物性参数可由文献[13]得到. 将以上参数代入式(3)~式(6)并对无量纲数进行拟合,可得  $Nu$ - $Ra$  曲线如

图 10 所示.

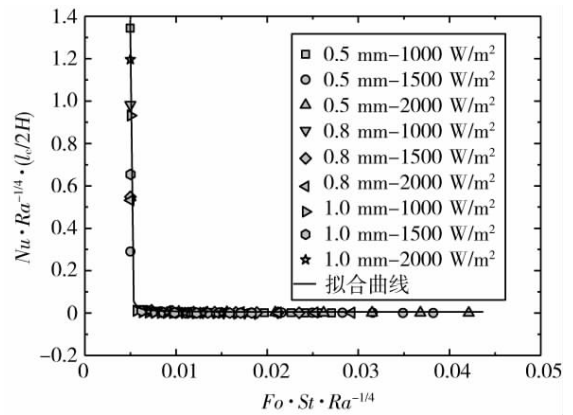


图 10  $Nu$ - $Ra$  曲线

Fig. 10  $Nu$ - $Ra$  plots

由图 10 可知,不同实验件的  $Nu$ - $Ra$  关联曲线吻合良好. 样件在相变的初始阶段,由于复合结构的导热系数很高,因此内部热阻较小,  $Nu$  在此阶段非常高;随着相变的进行  $Nu$  剧烈下降并趋于恒定值,其转折点为  $Fo \cdot St \cdot Ra^{-1/4} \approx 0.005$ . 对图中曲线,可采用下式进行拟合

$$Y = \frac{P_1 \cdot X}{P_2 + X} \quad (9)$$

式中  $X = Fo \cdot St \cdot Ra^{-1/4}$ ,  $Y = Nu \cdot Ra^{-1/4} \cdot (l_c/2H)$ . 在实验条件下可得拟合系数为

$$P_1 = 0.00406, \quad P_2 = -0.00496$$

由此可得适用于翅片-泡沫铜/石蜡相变过程的无量纲关联式为

$$Nu = 8.12 \times 10^{-3} \left[ \frac{Fo \cdot St \cdot (H/l_c)}{Fo \cdot St \cdot Ra^{-1/4} - 0.00496} \right] \quad (10)$$

## 2.6 不确定度分析

实验所采用的铂电阻温度传感器的测量误差为  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ , 热流密度  $q$ 、翅片宽度  $l_f$ 、泡沫铜/石蜡结构的等效导热系数  $\lambda_c$  的最大不确定度分别为 3%, 0.03% 和 4%. 根据式(3)~式(6),各无量纲数的最大不确定度如表 1 所示.

表 1 无量纲数最大不确定度

Table 1 Biggest uncertainty of nondimensional number

| 无量纲数 | 最大不确定度/% |
|------|----------|
| $Ra$ | 8.57     |
| $Fo$ | 4.02     |
| $St$ | 4.86     |
| $Nu$ | 6.46     |

### 3 结 论

本文提出了采用翅片-泡沫铜复合结构作为相变储能材料导热增强介质的概念,并通过实验测量对翅片-泡沫铜/石蜡复合材料的储能过程进行了研究,得到如下结论:

1) 翅片-泡沫铜形成的主干加网状的热沉结构使热源热量能够沿翅片高度方向迅速传导并快速向整个储能装置内扩散,装置的有效导热系数和热响应速度得到显著提高,为航空大功率电子设备的散热提供了一条有效途径。

2) 翅片数量一定的情况下,装置内最大温差随着加热功率的增加而增大,随着翅片厚度的增加而减小。在相同热流密度下,添加翅片后实验件的温度均匀性较不含翅片实验件提高了 73.2%~90.0%。

3) 通过实验数据得到了适用于翅片-泡沫铜/石蜡复合材料相变过程的  $Nu-Ra$  无量纲关联式,深入研究了相变过程中的传热特性。

### 参考文献:

- [1] Calmidi V V, Mahajan R L. The effective thermal conductivity of high porosity fibrous metal foams[J]. Journal of Heat Transfer, 1999, 121(2): 466-471.
- [2] Bhattacharaya A, Calmidi V V, Mahajan R L. Thermophysical properties of high porosity metal foams[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(5): 1017-1031.
- [3] Boomsma K, Poulikakos D. On the effective thermal conductivity of a three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(4): 827-836.
- [4] 张涛, 余建祖. 泡沫铜作为填充材料的相变储热实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(9): 1021-1024.
- [5] ZHANG Tao, YU Jianzu. Experiment of solid-liquid phase change in copper foam[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(9): 1021-1024. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] ZHANG TAO, YU Jianzu. Analysis on thermal conductivity enhancement for PCM embedded in metal foam[J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(6): 13-17. (in Chinese)
- [8] Saha S K, Dutta P. Heat transfer correlations for PCM-based heat sinks with plate fins[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(16): 2485-2491.
- [9] Nayak K C, Saha S K, Srinivasan K, et al. A numerical model for heat sinks with phase change materials and thermal conductivity enhancers[J]. International Journal of Mass and Heat Transfer, 2006, 49(11/12): 1833-1844.
- [10] Lamberg P, Siren K. Analytical model for melting in a semi-infinite PCM storage with an internal fin[J]. Heat and Mass Transfer, 2003, 39(2): 167-176.
- [11] Lamberg P, Siren K. Approximate analytical model for solidification in a finite PCM storage with internal fins[J]. Applied Mathematical Modelling, 2003, 27(7): 491-513.
- [12] Gustafsson S E. Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity of solid materials[J]. Review of Scientific Instruments, 1990, 62(3): 797-804.
- [13] Log T. Transient plane source (TPS) technique for measuring thermal transport properties of building materials[J]. Fire and Materials, 1995, 19(1): 43-49.
- [14] Kathare V, Davidson J H, Kulacki F A. Natural convection in water-saturated metal foam[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(15/16): 3794-3802.
- [15] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [16] YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998. (in Chinese)