

# 一种新型储能装置充冷过程的实验及分析

迟蓬涛 谢永奇 余建祖 杨宪宁

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

**摘 要:** 近年来,泡沫金属作为填充材料在强化传热方面的功效已被越来越多的研究证实.采用泡沫铜和水构成新型复合相变材料,制成一种高效储能装置,通过模拟实验研究,测试了这种储能装置在冷藏装备上的保温效果.进而采用准稳态法建立了复合相变材料的数学模型并进行了数值仿真计算,计算结果与实验测试结果相符.实验和数值仿真结果都表明,相对传统储能装置,新型储能装置充冷迅速而充分,整体的传热速率和储能效率得到了显著提高,在冷藏运输中有非常好的应用前景.

**关键词:** 传热;相变材料;泡沫铜;储冷;冷藏运输车

**中图分类号:** TK 021

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2011)09-1070-06

## Experiment and analysis for cold charging process of new energy storage device

Chi Pengtao Xie Yongqi Yu Jianzu Yang Xianning

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The heat transfer enhancement effect of the metal foam has been verified by dozens of researches. In order to test the cold charging effect, a new type of high-efficiency energy storage devices was made up by composite phase change material (PCM), which was consisted of copper foam (the heat transfer enhancement) and water. Via experimental study, the heat preservation effect of the devices in the refrigeration equipments was simulated. The model was set up and calculated through quasi-stable state method, and the results meet the test results very well. The cold charging process of the new type energy storage devices was approved to be faster and more adequate compared to the traditional energy storage devices. The entire heat transfer velocity and energy storage efficiency are obviously improved, which promises a good prospect in the refrigerated transportation.

**Key words:** heat transfer; phase change materials (PCM); copper foam; cold storage; refrigerated containers

随着社会的发展和科技的进步,冷藏运输在人们日常生活中的作用越来越重要.我国自20世纪70年代以来,冷藏运输得到了长足的发展.对于长距离或无冷源的运输,通常采用的保温方法是在车厢内加装传统冷板<sup>[1]</sup>.但由于传统冷板内的相变材料导热系数过低(通常为 $0.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 数量级),导致冷板存在充冷时间较长和充冷不完全等问题,严重限制了传统冷板在冷藏运输

中的应用.为了改善冷板内部材料的导热性能,可在其中添加金属翅片、金属网格、金属粉末等填充材料,国内外许多研究人员都在这方面做了大量工作<sup>[2-8]</sup>,但结果表明这些填充物对相变材料导热性能的改善并不明显.泡沫铜作为一种新型的轻质多孔材料,具有孔隙均匀连贯,比表面积大,加工和切割特性良好等特点,在强化传热方面的作用日益彰显<sup>[9-15]</sup>.

收稿日期: 2010-04-30

基金项目: 航空科学基金资助项目(2004ZE51048)

作者简介: 迟蓬涛(1984-),男,山东蓬莱人,博士生,heartao@gmail.com.

目前,大部分研究仅限于理论或泡沫金属本身的实验,尚未见真正将泡沫金属与相变材料结合并将其制成模块式储能装置应用于冷藏装备的研究.本文采用泡沫铜作为传热强化介质,与相变材料(水)构成复合相变材料并制成高效相变储能样件,通过模拟实际冷藏运输环境的实验,对装置的充冷过程进行了研究,并通过理论计算验证了泡沫铜对提高材料整体导热系数和储能效率的效果,为大幅提高冷板在冷藏运输中的性能提供了一条可行途径.

## 1 实验件的制作和测试

### 1.1 实验材料

实验材料主要包括水、泡沫铜和不锈钢管.

由于纯水存在较大过冷度,因此在水中加入了成核剂来改善其相变特性.

所购买的泡沫铜为国内生产,由电解沉积法制成,即以泡沫塑料为基底,经导电化处理后铜原子沉积于泡沫塑料的表面,待成型后将泡沫塑料基底燃烧去除,只剩下泡沫铜骨架.采用此种方法制成的泡沫铜,孔隙率最高可达98%,具有三维网络结构.泡沫铜内部孔洞均匀且相互连通,孔径0.5~5 mm.实验中选用的泡沫铜孔隙率为96%,孔径为1~1.5 mm.

实验中采用了304不锈钢管作为外壳材料.

### 1.2 实验装置

实验设备主要包括数据采集仪、直流稳压稳流电源、探针式PT100温度传感器等.其中数据采集仪是使用美国Agilent 34970A型多功能数据采集仪,包含有3块20接口的HP34901A插入式模块,其作用为记录并转换铂电阻测得的温度数据;电源采用DH1716A型0~250 V直流稳压稳流电源,最大输出功率1250 W;温度测量采用测量范围为-50~100℃的探针式铂电阻(PT100),直径为2 mm;泡沫铜-水复合材料导热系数的测量采用瑞典HotDisk热参数分析仪.

### 1.3 样件结构

相变储能样件的外壳采用外径为55 mm、壁厚为1.5 mm的不锈钢管制成(相变材料有效直径为52 mm),外观如图1所示,上下底面均焊接有不锈钢板.样件上底面焊接有灌注孔;探针式温度传感器由下底面插入样件内部.

温度传感器的分布如图2所示,在图示第1层和第2层位置各对称布置两个传感器,第5个传感器置于储能管中心.



图1 相变储能样件外观图

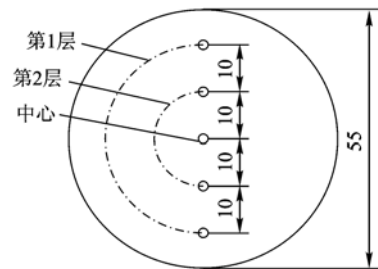


图2 温度传感器分布(单位:mm)

为了验证泡沫铜对材料导热性能的改善,实验中制作了4个样件以供对比分析.样件1和样件2内部嵌入泡沫铜芯体作为传热强化介质,如图3所示,将孔隙率为96%的泡沫铜采用线切割的方法加工成圆柱形后,在其侧面涂导热胶与样件1、2的壳体内壁进行粘接.样件3和4内部未嵌入泡沫铜.



图3 泡沫铜芯体

在样件的下底面按图2所示位置钻孔,并插入探针式温度传感器,而后对其进行固定和密封.传感器通过接线端子与数据采集仪相连,能够实施监测并获得储能装置样件内部的温度变化.将水由灌注孔灌入样件内,完成后用密封胶密封,待24 h完全凝固后进行实验.

将样件置入低温箱内,模拟实际冷藏运输中的温度环境,分别对样件1和2,样件3和4进行充冷时间的测试.实验台系统如图4所示.

假设运输装备冷藏室内制冷机组所提供的冷风温度为-10℃,储能样件的初始温度为25℃,现采用密闭低温箱对此条件下储能样件的充冷过程进行模拟,并对样件内部温度分布进行采集.实验中将低温箱的风温设定为-10℃,依靠低温箱



图4 实验台系统构成

内的强制对流对储能管进行充冷.

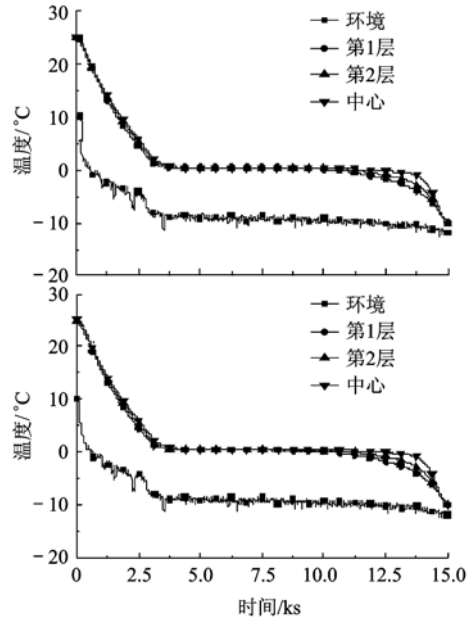
### 1.4 实验结果分析

整理得到充冷过程中样件1和2、样件3和4内部温度随时间变化分别如图5a和图5b所示.

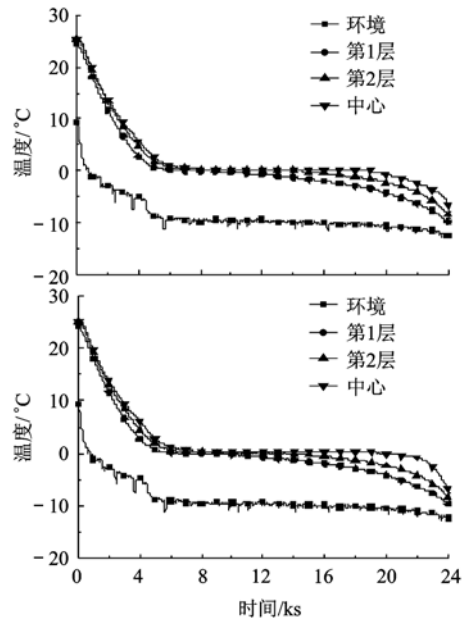
由图5a可知,样件1和2内部材料的相变过程约从3200s时开始,14300s时结束,整个充冷过程持续的时间约为11100s;由图5b可知,样件3和4内部材料的相变过程约从5500s时开始,22500s时结束,整个充冷过程持续的时间约为17000s.样件1比样件2的充冷时间缩短了34.7%.

对比图5a和图5b可知,在相同条件下,样件1和2由室温降至0℃的时间约为3200s,明显短于样件3和4的温降时间(5500s).样件1和2在相变过程中,3个结构层之间的温差非常小,3条温度曲线几乎重合,仅在拐点处出现分离;而样件3和4在相变过程中,3个结构层之间的温差较大,外部(第1层)相变材料的相变过程明显快于内部(中心)相变材料的相变过程.这是因为,采用纯水作为相变材料时,由于储能管外壳与低温箱环境空气(温度为-10℃)之间的对流换热系数相对较大,冷量通过外壳传到储能管内,致使样件3和4靠近管内壁的水首先发生相变,但由于水的导热系数较小,仅为0.551 W/(m·K),冷量不能有效地传导至样件内部,这就造成样件3和4内、外层之间温度梯度较大.而样件1和2由于采用了泡沫铜作为传热强化介质,其内部复合相变材料的微结构和冷量传递过程如图6所示.

由图6可知,相变材料与泡沫铜结合后,内部即被分隔为许多微小传热单元(图6a所示).泡沫铜的金属纤维实际在储能装置内部构成了一个传热网络,由于金属铜的导热系数较高,冷量通过外壳后沿金属纤维快速传递,并迅速扩散到整个储能装置内部,而后换热过程即在由金属纤维包围且具有大比表面积的小传热单元(图6b所示)内进行,并在较短时间内使所有小单元内的水完成冷凝相变过程.这样就在其他物性变化不大的



a 样件1和样件2的充冷过程



b 样件3和样件4的充冷过程

图5 储能装置样件的充冷过程

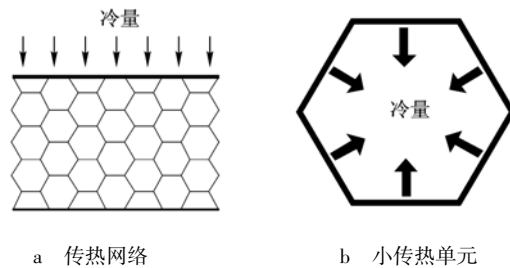


图6 样件1内部换热示意图

情况下,使复合相变材料的等效导热系数和储能效率得到了很大提高.因此本实验中,样件1和2不仅充冷速率大于样件3和4,且内部的温度均匀性也比样件3和4高.

综上所述,由于采用了泡沫铜作为传热强化介质,储能装置内部的传热速率得到了较大提高,装置内部温度分布的均匀性也得到了较好地改善.另外,由于泡沫铜孔洞分布均匀细腻,金属纤维和水混合均匀,相变过程与纯水相类似,可将复合物看作物性均一的普通相变材料,这样可大大简化复合相变材料传热过程研究和热设计的难度.在传统相变材料中加入泡沫铜形成复合相变材料,可以有效解决传统冷板所存在的充冷速率低和充冷不完全的问题.

根据实验条件和上述结论,可将实验模型做相应的简化,对凝固时间进行数值计算,进一步深化对复合相变材料传热机理的认识,寻求合理的计算模型和方法.

## 2 数值计算

### 2.1 数学模型

根据实验件的尺寸和实验条件,现采用准稳态法,建立图7所示的数值计算模型,对实验结果进行验证.由于相变材料的显热相对潜热比较小,因此数值模型中斯蒂芬数(Stefen)  $S_{te} \ll 1$ .

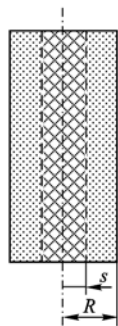


图7 充冷过程的数学模型

如图7所示,圆柱体的半径为  $R$ ,固液界面至圆柱中心的距离为  $s$ ,现对相变过程作如下假设:  
 ①相变材料的热物性为常数;②管壁热阻忽略;  
 ③  $S_{te} \ll 1$ ;④管两端不参与换热.

由以上假设,根据圆柱坐标系的导热公式,可得问题数学描述为

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad s < r < R \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为相变材料的等效密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_p$  为相变材料的定压比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .

边界条件:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_a - T) \quad r = R, t > 0 \quad (2)$$

式中,  $h$  为对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $T_a$  为环境温度,  $\text{K}$ .

初始条件:

$$T = T_m \quad (3)$$

式中,  $T_m$  为相变材料的相变温度,  $\text{K}$ .

固液界面:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \rho L \frac{ds}{dt} \quad (4)$$

式中,  $L$  为相变材料的潜热,  $\text{kJ}/\text{kg}$ .

引入下列无量纲量:

$$B_i = \frac{hR}{\lambda}, S = \frac{s}{R}, \tau = S_{te} \cdot Fo = \frac{c_p(T_m - T_a)}{L} \cdot \frac{t\alpha}{R^2}$$

式中,  $\alpha$  为热扩散率,  $\text{m}^2/\text{s}$ .

代入式(2)~式(5),可解得界面移动关系式如下:

$$\tau = \frac{1}{4} + \frac{1}{2B_i} - S^2 \left( \frac{1}{4} + \frac{1}{2B_i} \right) + \frac{S^2 \cdot \ln S}{2} \quad (5)$$

相变结束时材料已经完全凝固,此时  $S = 0$ ,代入式(5)有:

$$\tau = \frac{1}{4} + \frac{1}{2B_i} \quad (6)$$

展开得

$$\frac{(T_m - T_a)\lambda t}{\rho LR^2} = \frac{1}{4} + \frac{\lambda}{2hR} \quad (7)$$

根据实验条件,材料相变温度与环境的温差  $T_m - T_a = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,相变材料半径  $R = 0.026 \text{ m}$ .

为了得到实验样件的充冷时间,需要对实验中样件表面的强制对流换热系数进行计算.实验中低温箱内循环风的风速  $u_\infty = 10 \text{ m/s}$ ,根据这个条件,实验环境的强制对流换热系数可由以下方法求出.

根据横掠管换热实验关联式<sup>[16]</sup>,对流换热的  $Nu$  计算式如下:

$$Nu = CRe^n Pr^{1/3} \quad (8)$$

式中,  $Re$  为雷诺数,特征速度为通道来流速度  $u_\infty$ ;  $Pr$  为普朗特数,定性温度  $(t_w + t_\infty)/2$ ,其中  $t_w$  为壁面温度,  $t_\infty$  为来流温度 ( $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ );  $n, C$  为特定值,由  $Re$  决定.

根据实验工况,有定性温度:

$$t_1 = \frac{t_w + t_\infty}{2} = \frac{0 - 10}{2} = -5 \text{ }^\circ\text{C}$$

由文献[16]查得  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  下,空气的导热系数  $\lambda_a = 2.40 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,运动黏性系数  $\nu = 12.855 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,普朗特数  $Pr = 0.7095$ .则有管外冷空气的雷诺数:

$$Re = \frac{u_{\infty} \cdot d}{\nu} = \frac{10 \times 0.055}{12.855 \times 10^{-6}} = 42784.91$$

根据文献[16],  $C = 0.0266$ ,  $n = 0.805$ , 代入式(8), 则可计算得对流换热的  $Nu$  数为

$$Nu = CRe^n Pr^{1/3} = 0.0266 \times 42784.91^{0.805} \times 0.7095^{1/3} = 126.88$$

由此可得到对流换热系数  $h$  为

$$h = \frac{\lambda_a Nu}{d} = \frac{2.40 \times 10^{-2}}{0.055} \times 126.8785 = 55.3652 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

样件1和2内为泡沫铜-水复合相变材料, 其等效密度  $\rho_1$  为

$$\rho_1 = 96\% \times 90\% \times \rho_{\text{水}} + 4\% \times \rho_{\text{铜}} = 1220.8 \text{ kg}/\text{m}^3$$

等效潜热  $L_1$  为

$$L_1 = 96\% \times 334 = 320.64 \text{ kJ}/\text{kg}$$

泡沫铜-水复合材料的导热系数  $\lambda_1$  可由 Hot-Disk 热参数分析仪测得, 其值为  $4.132 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

样件3和4内相变材料为纯水, 其密度  $\rho_2 = 900 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 潜热  $L_2 = 334 \text{ kJ}/\text{kg}$ , 导热系数( $0^\circ\text{C}$ 时)  $\lambda_2 = 0.551 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

分别将样件1和2、样件3和4的参数代入式(7), 可求得样件充冷时间的计算值  $t_{1,2}$  和  $t_{3,4}$  分别为

$$t_{1,2} = 10792 \text{ s}$$

$$t_{3,4} = 16278 \text{ s}$$

即样件1和2凝固时间的理论值为  $10792 \text{ s}$ , 较实验值( $11100 \text{ s}$ )的误差为  $2.77\%$ ; 样件3和4凝固时间的理论值为  $16278 \text{ s}$ , 较实验值的误差为  $4.25\%$ . 理论计算与实验结果吻合较好, 说明所建数学模型和数值计算方法正确, 可用于指导热设计计算.

## 2.2 不确定度分析

根据充冷时间的推导公式, 各相关参数如式(9)~式(12)所示.

$$Re = \frac{u_{\infty} \cdot d}{\nu} \quad (9)$$

$$Nu = 0.0266 Re^{0.805} Pr^{1/3} \quad (10)$$

$$h = \frac{\lambda_a Nu}{d} \quad (11)$$

$$t = \frac{\rho LR}{T_m - T_a} \left( \frac{R}{4\lambda} + \frac{1}{2h} \right) \quad (12)$$

由式(9)~式(12)可知, 实验中  $Re$  的不确定度可由低温箱风速和储能管外径确定,  $Nu$  的不确定度可由  $Re$  确定, 对流换热系数  $h$  的不确定度可

由  $Nu$  和储能管外径确定, 凝固时间  $t$  的不确定度可由相变材料半径、相变温差、导热系数和对流换热系数确定. 实验中各个物理量的最大不确定度见表1.

表1 各参数的最大相对不确定度

测量参数	不确定度/%
低温箱风速 $u_{\infty}$	2.00
储能管外径 $d$	0.36
$Re$	2.36
$Nu$	1.90
对流换热系数 $h$	2.26
相变材料半径 $R$	0.36
相变温差 $T_m - T_a$	4.00
复合材料导热系数 $\lambda$	6.00

根据表1及式(9)~式(12), 可求得凝固时间  $t_{1,2}$  和  $t_{3,4}$  的最大不确定度如表2所示.

表2 凝固时间的最大不确定度

参数	不确定度/%
样件1和2凝固时间 $t_{1,2}$	6.22
样件3和4凝固时间 $t_{3,4}$	7.48

由计算结果可知, 样件1和2、3和4的理论值和实验误差分别为  $2.77\%$  和  $4.25\%$ , 均在表2所示的最大不确定度内, 说明理论计算与实验结果能够相互验证. 由结果可知, 计算值小于实验值, 其原因可能为: ①理论模型中忽略了不锈钢管壁和相变材料之间的传热热阻; ②实验中低温气流的温度稍高于理论取值( $-10^\circ\text{C}$ ); ③实验中低温箱风速并不恒定.

## 3 结论

根据对储能装置样件的实验研究和理论分析可得到以下结论:

1) 泡沫铜与相变材料结合构成复合相变材料后, 热量能够沿金属纤维快速传递, 并通过较大的比表面积迅速扩散至复合材料内部, 材料的有效导热系数能够得到显著提高;

2) 采用泡沫铜作为导热增强介质, 能够大大提高储能装置样件内部的温度均匀性, 使得装置内部无论是在固态、液态还是相变过程中, 都保持了较小温差, 有利于相变过程快速、高效、充分地进行;

3) 复合相变材料的相变过程与纯相变材料类似, 可以将其看作物性均一的材料利用普通相变材料设计过程进行热设计.

通过实验和理论研究表明, 在传统储能装置中加入泡沫铜, 大大提高了装置的充冷速率, 不仅能够稳定运输空间内的温度场, 提高储运品的运

输质量,而且大幅提高了运输装备在断电应急情况下的保温能力.实验和理论研究表明,这种新型装置在各类军用和民用冷藏运输装备上有良好的应用前景.

### 参考文献 (References)

- [1] 阚杰,郝亮,李涛,等.机械冷板冷藏车的发展与改进方向[J].制冷与空调,2005,5(5):58-60  
Kan Jie, Hao Liang, Li Tao, et al. The development and modification direction of the hold-over plate refrigerated vehicles[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2005, 5(5): 58-60 (in Chinese)
- [2] Fukai J, Hamada Y, Morozumi Y, et al. Effect of carbon-fiber brushes on conductive heat transfer in phase change materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(24): 4781-4792
- [3] Py X, Olives R, Mauran S. Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(14): 2727-2737.
- [4] 张正国,王学泽,方晓明.石蜡/膨胀石墨复合相变材料的结构与热性能[J].华南理工大学学报:自然科学版,2006,34(3):1-5  
Zhang Zhengguo, Wang Xueze, Fang Xiaoming. Structure and thermal properties of composite paraffin/expanded graphite phase-change material[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2006, 34(3): 1-5 (in Chinese)
- [5] Velraj R, Seeniraj R V, Hafner B. Heat transfer enhancement in a latent heat storage system[J]. Solar Energy, 1999, 65(3): 171-180
- [6] Padmanabhan P V, Murthy M V. Outward phase change in a cylindrical annulus with axial fins on the inner tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1986, 29(12): 1855-1868
- [7] Siegel R. Solidification of low conductivity material containing dispersed high conductivity particles[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1977, 20(10): 1087-1089
- [8] Velraj R, Seeniraj R, Hafner B, et al. Experimental analysis and numerical modelling of inward solidification on a finned vertical tube for a latent heat storage unit[J]. Solar Energy, 1997, 60(5): 281-290
- [9] 曹建光,步柄根,李强,等.泡沫铝在相变储能装置中的应用[C]//《卫星热控制技术研讨会论文集》编委会.卫星热控制技术研讨会论文集.北京:中国人民解放军总装备部卫星技术专业组,2003:297-305  
Cao Jianguang, Bu Binggen, Li Qiang, et al. The application of aluminum in the phase change energy storage devices[C]// Editorial Committee of Seminar Memoirs of the Thermal Controlling Technology for Satellite. Discussion Forum Symposium of the Thermal Controlling Technology for Satellite. Beijing: Satellite Technology Group of Master Equipment Ministry of PLA, 2003: 297-305 (in Chinese)
- [10] Hoogendoorn C J, Bart G C J. Performance and modelling of latent heat stores[J]. Solar Energy, 1992, 48(1): 53-58
- [11] 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  
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)
- [12] 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 (in Chinese)
- [13] Krishnan S, Murthy J Y, Garimella S V. A two-temperature model for solid-liquid phase change in metal foams[J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(9): 995-1004
- [14] Alawadhi E M, Amon C H. PCM thermal control unit for portable electronic devices; experimental and numerical studies[J]. IEEE Trans Compon Packag Technol, 2003, 26(1): 116-125
- [15] Ali S Siahpush. Performance enhancement of solid/liquid phase-change thermal energy storage systems through the use of a high conductivity porous metal matrix[D]. Idaho: Department of Mechanical Engineering, University of Idaho, 2002
- [16] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].3版.北京:高等教育出版社,1998:173-174  
Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat transfer[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1998: 173-174 (in Chinese)

(编辑:李晶)