

文章编号: 0253-4339(2009)01-0001-06

自然对流对泡沫金属复合相变储能的影响实验研究

张涛 余建祖 高红霞

(北京航空航天大学航空科学与工程学院 北京 100191)

摘 要 制作了四面绝热的泡沫金属/石蜡复合相变储热装置,在不同功率密度下分别对存在自然对流和不存在自然对流两种情况下装置的固-液相变储热过程进行了对比实验研究。整理绘制了在不同加热功率下的温度-时间曲线,并采用常热流边界条件下半无限大物体熔化过程的数学解对实验件受热面温度进行了模拟,结果表明在大功率密度情况下从底部加热会形成较为明显的自然对流,并且自然对流的存在增强了储热装置的内部传热,储热效率提高为原来的1.38倍,在5000W/m²功率下热源最大温度比原来低26℃。

关键词 工程热物理; 储能技术; 泡沫金属; 相变材料; 自然对流; 储能效率

中图分类号: TK02; TQ026.7

文献标识码: A

Experiment on Thermal Conductivity Enhancement for PCM Embedded in Metal Foam

Zhang Tao Yu Jianzu Gao Hongxia

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

Abstract A phase change thermal storage device with Metal Foam/Paraffin Wax was developed which has insulated walls around and the experiment on the device performance was conducted at different power density under the condition with and without natural convection, respectively. The temperature variation with time under different heating power was obtained and a semi-infinite model with the second kind boundary conditions was used to simulate the bottom temperature of the tested vessel. The experimental results show that the obvious natural convection occurred in the melting part when the tested vessel was heated from below, and the heat-transfer capability and the thermal storage efficiency of the thermal storage device improved significantly because of the effect of convection. The thermal storage efficiency with the effect of convection was 38% greater than that without the effect of convection, and the maximum bottom temperature decreased by about 26℃ at 5000W/m².

Keywords Engineering thermophysics; Energy storage technique; Metal foam; PCM; Natural convection; Thermal storage efficiency

随着人们对环境保护和能源利用的日益重视,相变储能技术越来越成为世界各国的研究热点,在太阳能利用、工业废热回收、电力的“移峰填谷”、以及工业与民用建筑采暖与空调的节能等领域相变储能技术都具有广泛的应用前景^[1-2]。但是,类似石蜡等很多相变材料导热率都较低,使得其作为储能材料时储能效率低下,大大限制了应用范围。

泡沫金属是一种在金属基体中均匀地分布着大量连通和不连通的孔洞的新型轻质多功能材料。由于其具有密度小、孔隙率高、比表面积大等特点^[3],近年来对泡沫金属内的对流和相变传热的研

究引起了学术界和工程界的极大兴趣。文献[4]中建立了泡沫金属内冻结相变传热过程的数学模型,采用显热容法模拟了泡沫金属内冻结过程的传热过程;文献[5]中给出了较通用的高孔隙率泡沫金属材料等效导热系数估算公式,并利用准稳态方法建立了复合相变材料在凝固过程的数学模型,对其凝固过程的传热特性进行了理论分析。文献[6]与文献[7]中分别采用泡沫铝和泡沫铜复合相变储热装置,实验表明泡沫金属的添加使得相变储热装置热性能得到了明显的改善。

但是在上述研究中,为了简便计算以及考虑到泡沫金属内通孔直径较小,所建立数学模型均假

设液态相变材料在泡沫金属内不产生任何自然对流。而在所进行的实验中, 储热装置往往采用金属外壳进行封装, 外壳导热能力远远高于泡沫金属与石蜡混合而成的相变芯体, 在较大加热功率时热量被壳体大量分流, 未能观察到明显对流现象。

将泡沫铜与铜底板和顶板焊接成一体, 利用绝热板组装制作了四壁绝热的复合相变储能装置, 通过热流自下而上和热流自上而下的对比实验, 以观察自然对流在复合相变储热装置中的影响。结果表明由于泡沫铜的高空隙特性, 装置内存在一定程度的自然对流, 尤其在高热流密度时这种对流影响不能忽略, 自然对流的存在增强了无效储能区(液态区)的传热能力, 提高了装置的整体热传导能力和储能效率。

1 实验描述

1.1 实验设备及材料

实验设备主要包括数据采集仪、直流稳压稳流电源、贴片式和探针式Pt100、石蜡熔灌器等。其中数据采集仪是使用美国安捷伦公司的Agilent 34970A型多功能数据采集仪, 包含有三块20接口的HP34901A插入式模块; 电源采用DH1716A型0~250V直流稳压稳流电源, 最大输出功率1250W; 温度测量采用范围0℃~100℃的铂电阻(Pt100), 分探针式和贴片式两种, 探针式Pt100直径为2mm, 贴片式Pt100面尺寸为15mm×10mm; 石蜡熔灌器为铝合金加工而成的漏斗状容器, 其底部嵌入加热棒, 加热功率为1100W。

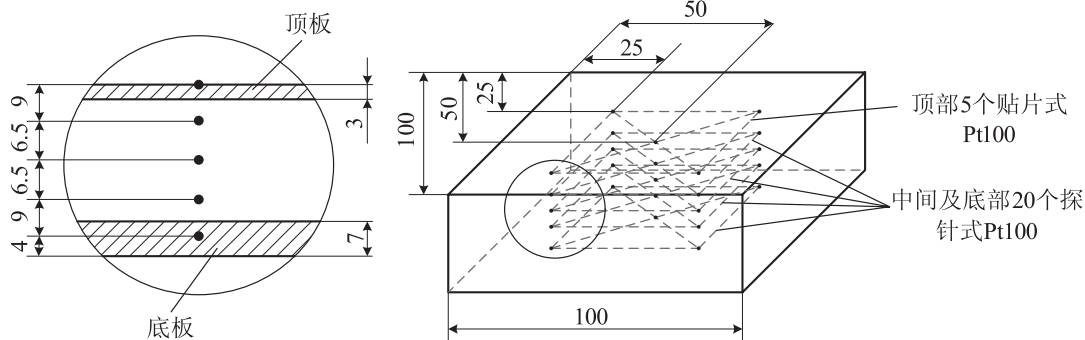


图3 芯体尺寸及测温点布置示意图

Fig.3 The locations of temperature monitoring points

为防止后期实验加热熔化过程中石蜡体积改变产生过大的膨胀应力, 灌注过程保持整个系统温度稳定在55℃, 灌注后进行密封处理, 使装置在冷却后留有一定真空空隙。

实验材料主要包括石蜡和泡沫金属。石蜡纯度 $\geq 98\%$, 熔点 36.8°C 。泡沫金属选用孔径2~3mm、空隙率为96%的通孔型泡沫铜作为填充材料。

1.2 实验件结构

实验件壳体是由铜底板—泡沫铜—铜顶板组合而成的“三明治”结构芯体和四块酚醛树脂绝热壁板嵌合封装而成, 如图1所示。“三明治”结构芯体尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 35\text{mm}$, 如图2所示, 芯体中的泡沫铜与顶、底板之间均采用软铅焊连接, 减小了接触热阻, 而实验件侧壁所用绝热壁板导热率很低($\leq 0.2\text{W/m} \cdot \text{K}$), 这样就保证了热量被芯体充分吸收, 减小了热损失和热分流, 使加热过程在厚度方向基本形成了一维传热情况。为了测试储能装置的热性能, 实验件沿厚度方向分为五个温度层共25个测温点, 测温点布置示意图如图3所示。采用真空灌注法^[7]将石蜡填充到实验件壳体中, 真空度 $\leq 1.0\text{Pa}$, 这样通过泡沫铜的高连通性和较高的真空度保证了相变材料填充的均匀度。

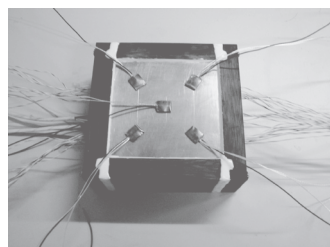


图1 实验件外观

Fig.1 Test vessel

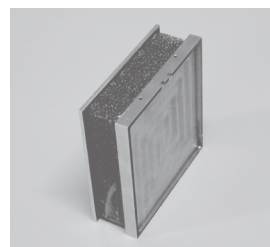


图2 “三明治”结构芯体

Fig.2 Sandwich structure

1.3 实验工况

实验在大气环境下进行, 环境温度 $25^\circ\text{C} \sim 26^\circ\text{C}$, 装置各面均采用绝热棉进行包裹以绝热, 包裹厚度大于50mm, 这样保证了热流从底板完全进入储热

装置中, 并且热量损失可忽略, 便于实验结果的对比和分析。实验时分别将储能装置水平放置和悬挂放置以获得和消除自然对流在熔化过程中的影响, 通过可调稳压电源控制底板中加热片的加热功率, 进行了 $500\text{W}/\text{m}^2$ 、 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 、 $2000\text{W}/\text{m}^2$ 、 $5000\text{W}/\text{m}^2$ 四种不同加热功率下的储热实验。

2 实验结果与分析

对相变储能装置进行了不同加热功率工况下的储热实验, 温度采集时间间隔为 10s , 整理并绘制了各个测温层的平均温度变化曲线, 结果如图4~图7所示。

1) 表征浮升力相对大小的格拉晓夫数 Gr 定义为

$$Gr = \frac{g\alpha\Delta t l^3}{\nu^2} \quad (1)$$

其中 g 为重力加速度; α 为流体热膨胀系数; Δt 代表液态区域内的温差; l 为特征尺寸, 在熔化过程中代表液态区域的厚度; ν 为流体的运动粘度系数。将式(1)中 Δt 通过傅立叶定律 $q = \frac{\lambda \cdot \Delta t}{l}$ 进行替换, 得到

$$Gr^* = \frac{g\alpha q l^4}{\lambda \nu^2} \quad (2)$$

其中, q 为热流密度, λ 为导热系数。

通过式(2)可以知道, 当加热功率为 $500\text{W}/\text{m}^2$ 时, 由于热流密度较小且液体层厚度受到装置尺寸的限制, 使得装置内相变材料在整个熔化过程中都未能产生足以克服粘性阻力的浮升力, 难以引起明显对流, 故此时水平放置和倒悬放置的传热过程都是以导热为主, 储能过程基本一致, 如图4所示。

而当加热功率增加到 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 时, 随着熔化的进行液态区域厚度逐渐增加, 受乘积项 $q l^4$ 的影响浮升力也逐渐增大, 在相变材料接近全部熔化时, 开始出现温度跃迁现象, 如图5(b)所示, 说明此时浮升力达到足以克服粘性阻力的水平, 装置内开始产生一定程度的自然对流。

2) 假设材料物性在所考虑温度范围内为定值, 则根据(2)式得到不同的加热功率下产生自然对流所需的液态区域厚度有以下关系 $q_a l_a^4 = q_b l_b^4$

$$\text{故 } \frac{l_a}{l_b} = \sqrt[4]{\frac{q_b}{q_a}} \quad (3)$$

因此, 根据在加热功率 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 下, 相变材料基本全部熔化时, 即液态区域厚度为 25mm 时

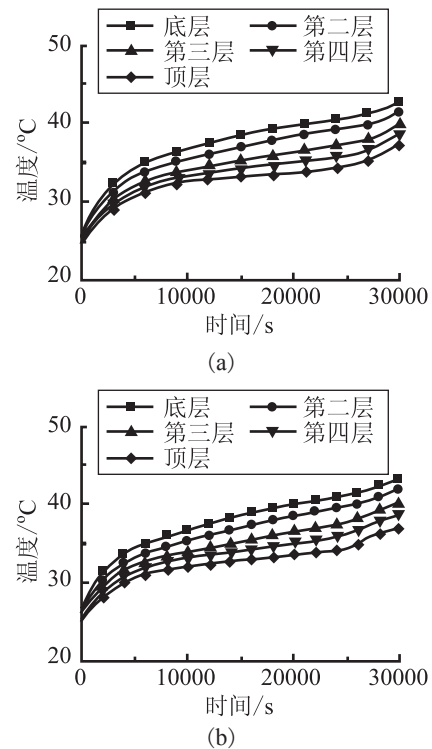


图4 $500\text{W}/\text{m}^2$ 工况下各层平均温度变化图:

(a) 倒悬放置, (b) 水平放置

Fig.4 Temperature-time histories at $500\text{W}/\text{m}^2$:

(a) reverse setting, (b) horizontal setting

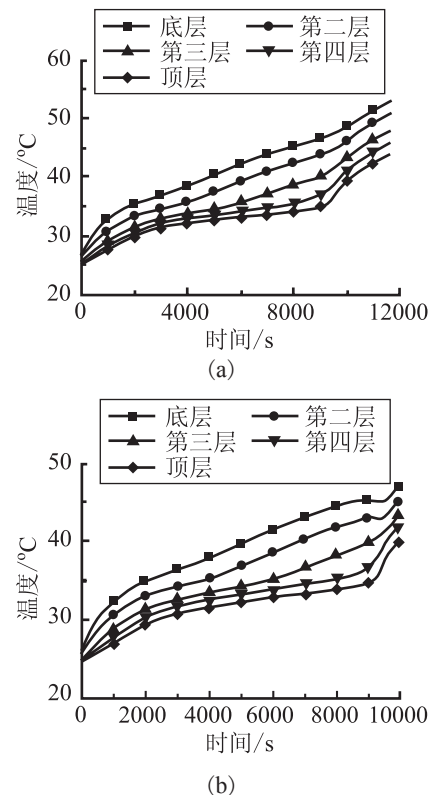


图5 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 工况下各层平均温度变化图:

(a) 倒悬放置, (b) 水平放置

Fig.5 Temperature-time histories at $1000\text{W}/\text{m}^2$:

(a) reverse setting, (b) horizontal setting

(尺寸见图3所示)产生自然对流, 则 2000W/m^2 与 5000W/m^2 情况下产生自然对流时液态层厚度为:

$$l_{2000} = \sqrt[4]{\frac{1000}{2000}} \times 25 = 21.0 \text{ mm}$$

$$l_{5000} = \sqrt[4]{\frac{1000}{5000}} \times 25 = 16.7 \text{ mm}$$

如图6(b)与图7(b)所示。

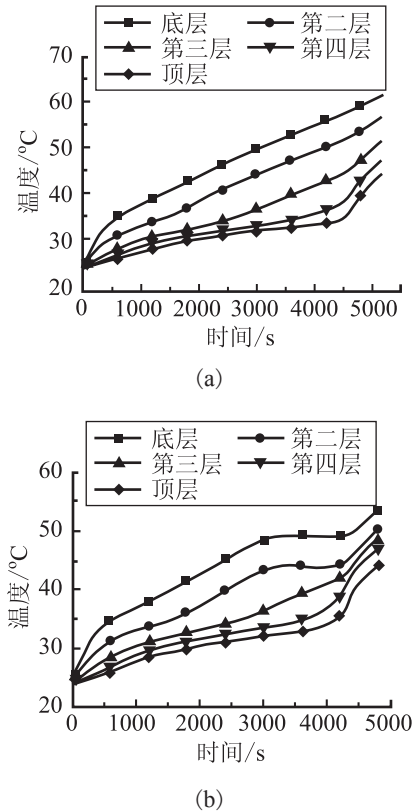


图6 2000W/m^2 工况下各层平均温度变化图:
(a)倒悬放置, (b)水平放置

Fig.6 Temperature-time histories at 2000W/m^2 :
(a) reverse setting, (b) horizontal setting

3) 倒悬放置条件下, 由于没有自然对流对传热的强化作用, 在储热过程中已熔化的石蜡层形成热源与未熔化石蜡之间的热阻, 不但降低了装置的储能效率, 并且由于热量堆积, 热源底板的温度迅速上升, 如图4(a)~图7(a)所示。而水平放置条件下由于相变储热过程中自然对流的出现, 通过对流换热快速将热量从热源底板传递到固态石蜡, 提高了储能效率, 也缓解了热量在热源处的堆积问题, 储能速率及热源温升都较没有自然对流的情况有明显改善。表1中列出了两种放置条件下熔化结束时热源底板的最高温度以及两种放置条件下熔化时间比值。

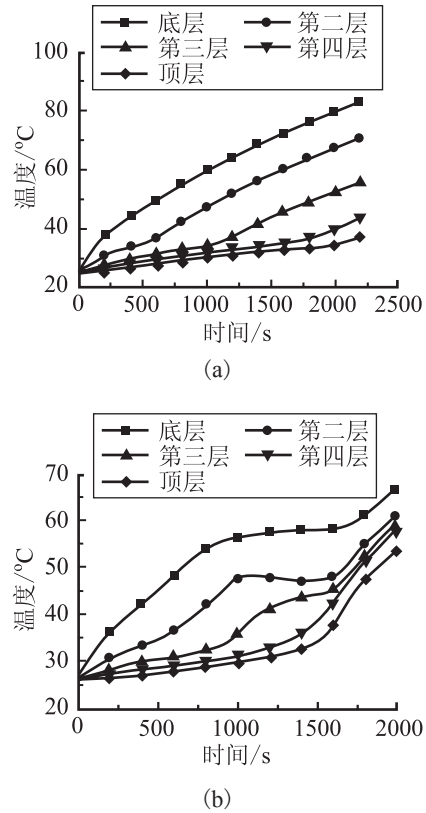


图7 5000W/m^2 工况下各层平均温度变化图:
(a)倒悬放置, (b)水平放置

Fig.7 Temperature-time histories at 5000W/m^2 :
(a) reverse setting, (b) horizontal setting

表1 最高底板温度和熔化时间比

Tab.1 Effective thermal conductivity as a function of porosity

加热功率 $/(W/m^2)$	熔化结束时 热源底板最高温度		熔化时间比 (无自然对流/ 有自然对流)
	无自然 对流情况	有自然 对流情况	
500	43℃	42℃	1.0
1000	47℃	45℃	1.10
2000	58℃	49℃	1.12
5000	84℃	58℃	1.38

4) 为了验证倒悬条件下实验结果没有受自然对流的影响, 运用常热流边界条件下半无限大物体熔化过程的数学解对实验件受热面(即底面)温度进行计算^[8-9], 计算结果如图8所示。

从图8中对比情况可以看出, 倒悬放置条件下以及较小加热功率时的水平放置条件下, 由于没有自然对流的影响, 受热面温度变化情况与只考虑导热为传热方式的相变过程数学计算结果非常吻合。而在较大加热功率时, 水平放置条件下在出现对流之前也基本符合导热方式的相变模型, 但随着相变

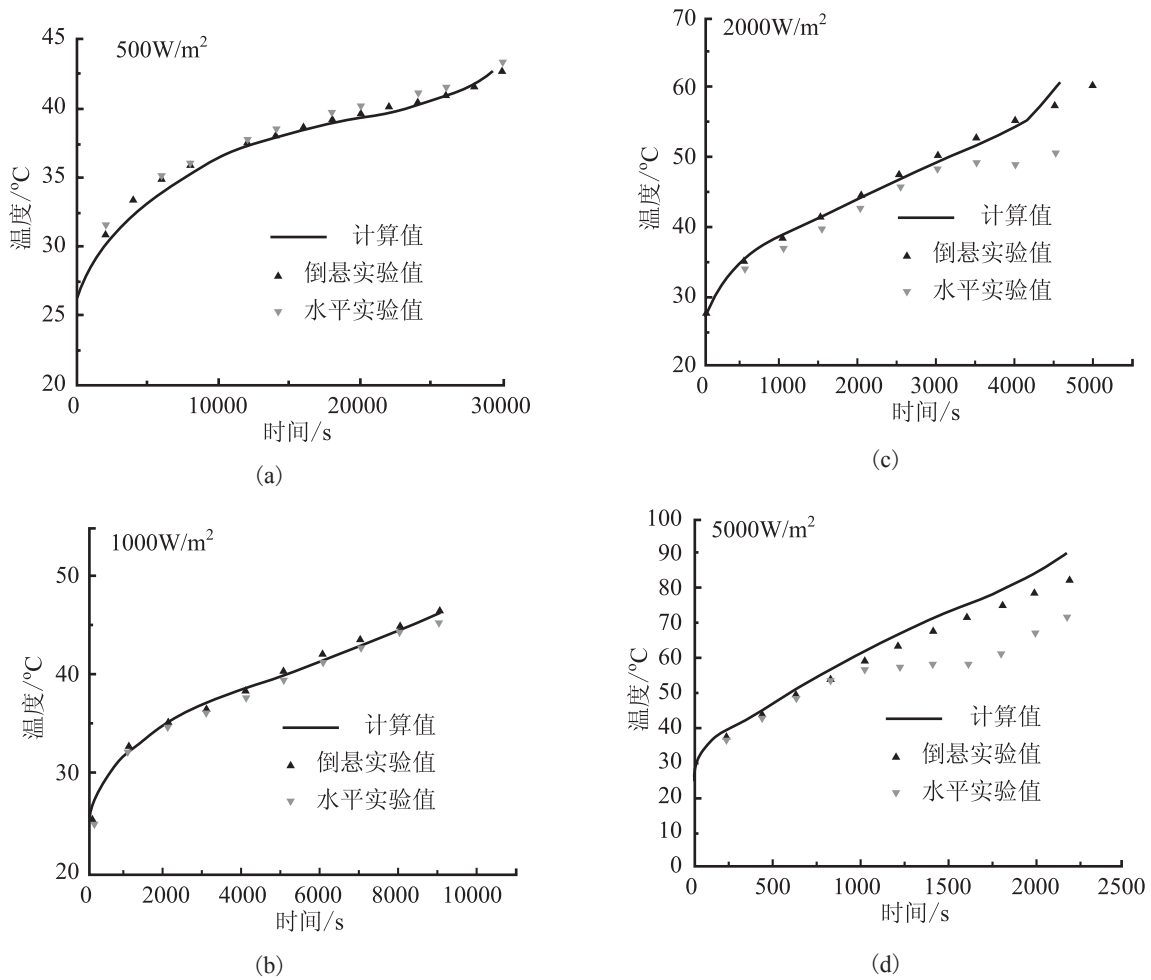


图8 各热流密度下底层温度计算值与实验值比较
Fig.8 Bottom temperature as a function of time: numerical results VS test results

的进行液体层不断增厚，当浮升力达到足够克服粘性阻力的时候对流出现，则由于对流的强化传热作用，底部温升速率迅速降低，在装置相变完全之前基本保持温度恒定。此时，单纯运用只考虑导热的相变物理模型将与实际情况产生较大差异，如图8中(c)和(d)所示。对于此种情况的描述，需考虑将模拟液体在多孔介质中流动的Darcy-Brinkman-Forchheimer模型与相变过程的Stephen模型相结合进行建模求解^[10]。

3 结论

由于泡沫金属具有较高孔隙率和连通性，在较高加热密度情况下泡沫金属/石蜡复合相变储热装置会出现一定程度的自然对流，并且在高热流密度下自然对流的影响不可忽略，只考虑导热作用的相变过程数学模型难以准确描述其传热过程，需结合Darcy-Brinkman-Forchheimer模型与Stephen模型

进行求解。自然对流的产生有效增强了相变装置内部的热传导能力，提高了相变储热效率，缓解了因相变过程产生的液态区热阻较大而引起的热量堆积问题。

(本文受航空科学基金资助项目(2004ZE51048)、教育部博士点基金资助项目(20040006012)、“凡舟”青年科研基金资助项目(20070505)资助。The project was supported by the National Aeronautic Science Foundation of China(2004ZE51048), the Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China(20040006012) and the “Fanzhou” Science Foundation for Young Scholars(20070505).)

参考文献

- [1] 张寅平, 康艳兵, 江亿. 相变和化学反应储能在建筑供暖空调领域的应用研究[J]. 暖通空调, 1999, 29(5): 34-38. (Zhang Yinping, Kang Yanbing, Jiang Yi. Applied research of thermal storage in phase change and

- chemical reaction in the building HVAC field[J]. *Heating, Ventilating & Air Conditioning*, 1999, 29(5):34-38.)
- [2] 谢晓峰, 陈爱英. 新型蓄能技术—相变蓄能[J]. 株洲师范高等专科学校学报, 2003, 8(5):13-17. (Xie Xiaofeng, Chen Aiyang. New Technology of Energy Storage—Phase Change Energy Storage[J]. *Journal of Zhuzhou Teachers College*, 2003, 8(5):13-17.)
- [3] 于英华, 李智超, 刘敬福. 多孔泡沫铝性能研究现状及应用前景展望[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(2): 259-260. (Yu Yinghua, Li Zhichao, Liu Jingfu. Research present situation and prospect for application on porous foam aluminum[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2003, 22(2):259-260.)
- [4] 陈振乾, 施明恒. 泡沫金属内流体冻结相变传热的数值模拟[C]. 制冷空调新技术进展—第四届全国制冷空调新技术研讨会论文集. 2006: 707-710.
- [5] 程文龙, 韦文静. 高孔隙率泡沫金属相变材料储能、传热特性[J]. 太阳能学报, 2007, 28(7): 739-744. (Cheng Wenlong, Wei Wenjing. Theoretical analysis of phase change material storage with high porosity metal foams[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2007, 28(7):739-744.)
- [6] 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.
- [7] 张涛, 余建祖. 泡沫铜作为填充材料的相变储热实验研究[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. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, 33(9):1021-1024.)
- [8] 贾力, 方肇洪, 钱兴华. 高等传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003, 62-64.
- [9] El-Genk M S, Cronenberg A W. Solidification in a semi-infinite region with boundary conditions of the second kind: an exact solution[J]. *Lett. Heat Mass Transfer*, 1979, 6:321-327.
- [10] Shankar Krishnan, Jayathi Y Murthy, Suresh V Garimella. A Two-Temperature Model for the Analysis of Passive Thermal Control Systems[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2004, 126(4):628-637.