

DOI: 10.7652/xjtub201801004

通孔金属泡沫强化蓄冰实验研究

白青松, 郭增旭, 刘亦琳, 杨肖虎, 金立文

(西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了研究通孔金属泡沫内嵌相变材料凝固过程特性及泡沫材料孔结构参数对凝固过程的影响,搭建了固液相变传热可视化测量系统,利用该系统就通孔铜泡沫强化蓄冰过程开展了实验研究。实时观测了凝固相界面的瞬态移动过程,测量了金属骨架表面和内嵌相变介质的实时温度,研究表明:铜泡沫可有效改善蓄冰后期传热恶化现象,大幅减少蓄冰时间,加入铜泡沫后,结冰所需时间与纯水工况相比减少为 48.86%(孔密度为 $1\,181\,\text{m}^{-1}$,孔隙率为 0.90)和 60.97%(孔密度为 $1\,181\,\text{m}^{-1}$,孔隙率为 0.97);铜泡沫的孔隙率对结冰过程影响较大,孔隙率为 0.90 的铜泡沫比孔隙率为 0.97 的铜泡沫中水完全凝固时间减少 20%,而孔密度对结冰过程影响可忽略不计。可视化结果表明,未凝固相局部自然对流导致凝固相界面发生倾斜,呈现下部略快于上部的凝固界面。

关键词: 相变传热;金属泡沫;凝固;实验研究

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)01-0020-06

Experimental Study on Enhanced Ice Storage in Open-Cell Metal Foams

BAI Qingsong, GUO Zengxu, LIU Yilin, YANG Xiaohu, JIN Liwen

(School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To explore the heat and mass transfer characteristics during the phase change in metal foams, a test rig with solid/liquid phase change heat transfer visualization device was designed and established. The effects of pore structure parameters on solidification process were measured. Results show that the involvement of open-cells in metal foam can significantly enhance the solidification process. The deterioration of phase change heat transfer can be compensated by the enhanced heat conduction with metal foam. The full solidification time can be reduced by 48.86% (pore density of $1\,181\,\text{m}^{-1}$ and porosity of 0.90) and 60.97% (pore density of $1\,181\,\text{m}^{-1}$ and porosity of 0.97), respectively, in comparison with the case of pure water. Porosity plays a vital role in solidification process but the influence of pore density upon solidification can be neglected. The full solidification time can be further reduced by 20% when the porosity decreases from 0.97 to 0.90. The visualization demonstrated an inclined solidification front, which indicated the contribution of local natural convection in the fluid phase. Local thermal equilibrium between metallic ligaments and the saturating PCM (distilled water) was experimentally observed.

Keywords: phase change heat transfer; metal foam; solidification; experimental study

冰蓄冷空调是近些年来发展起来的一种新型空调,可利用峰谷电价夜晚蓄冰,白天融冰供冷,实现

收稿日期: 2017-07-20。 作者简介: 白青松(1993—),男,硕士生;杨肖虎(通信作者),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51506160);陕西省自然科学基金资助项目(2017JQ5007)。

网络出版时间: 2017-10-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20171018.1437.002.html>

谷电峰用,从而降低空调系统运行成本并能平衡电网负荷^[1]。在冰蓄冷空调中,蓄冰过程直接影响着整个空调系统的供冷效率,然而由于相变材料(如石蜡、水等)导热系数普遍较低,相变蓄冷效率低下,储能和释能周期长,限制了相变蓄冷技术的广泛应用^[2-5]。因此,对蓄冰过程进行研究,寻找提高蓄冰效率的方法显得尤为重要。

通孔金属泡沫是近几十年发展起来的一种新型轻质材料,具有密度小、孔隙率高、比表面积大、骨架导热率高等特性^[6-7],前期研究表明,通孔金属泡沫在电子元器件热管理、燃料电池和紧凑型热交换器等领域有着广阔的应用前景^[6-8]。丰富的比表面积和内部相互贯通的孔隙结构可使得相变材料内嵌,形成相变材料-金属泡沫复合结构,以强化固液相变传热。

蒋玉龙等对填充泡沫材料的冰蓄冷板内的融冰过程建立了相变传热数学模型,并考虑了自然对流的影响,分别通过模拟和实验的方法研究了通孔聚氨酯泡沫和铜泡沫对融化过程的影响,结果表明:高导热率的金属泡沫能有效改善冰蓄冷板的温度分布并提高其融冰能力,而低导热率的聚氨酯泡沫可延长冰蓄冷板的释冰时间,且释冰所需时间随孔密度减小而增加^[9]。施娟等通过实验比较了普通蓄冰球和填充有金属泡沫的蓄冰球内蓄冰的动态变化过程,实验表明:相同制冷条件下,填充有金属泡沫的蓄冰球中相变材料进入相变状态速度较快,完成相变过程时间较短,说明金属泡沫能有效地强化蓄冰过程,提高换热效率^[10]。杨秀和陈振乾建立了蓄冰球中填充铝泡沫的融化相变过程自然对流模型,模拟了单个冰球二维融化过程的温度场和相界面移动规律^[11]。Yang 等对相变材料-金属泡沫复合结构的凝固过程进行了实验及数值模拟研究,并与拓展后的经典 Neumann 解预测结果进行对比,实验可视化结果显示:相界面在宏观尺度下平坦规则,但孔隙尺度下的数值模拟显示凝固相界面呈现不规则的微观凹凸^[12]。Feng 等针对金属泡沫底部冷却的定向凝固过程做了实验和数值模拟研究,在忽略自然对流对凝固过程的影响下,对金属泡沫与基板间的接触热阻做了分析,结果表明由于冰的导热系数($\sim 2.26 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)很大,金属泡沫与基板间的接触热阻可忽略不计^[13]。

目前虽然已有大量针对蓄冰过程的研究,但采用金属泡沫对蓄冰过程进行强化的研究相对较少,而针对竖直方腔内侧壁冷却条件下利用金属泡沫强

化蓄冰过程的研究还未见报道,尤其关于液相区存在的自然对流对蓄冰过程影响的研究仍未开展。为此,本文针对竖直方腔内侧壁冷却下金属泡沫强化蓄冰过程进行了实验研究,采用蒸馏水作为相变工质,搭建了相变界面可视化实验台对其蓄冰过程中相界面的迁移进行了观察,探索自然对流对蓄冰过程影响的特性规律。

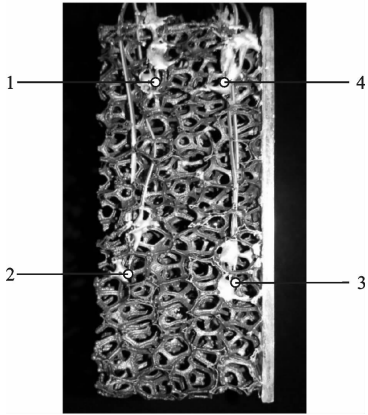
1 实验装置

1.1 实验试件

本文将具有不同孔隙结构参数(孔密度和孔隙率)的铜泡沫切割成具有相同规格尺寸($68 \text{ mm} \times 68 \text{ mm} \times 28 \text{ mm}$)的试样,详细参数见表 1,泡沫试样如图 1 所示,分别在铜泡沫试样金属杆表面和相变材料内布置热电偶,以监测相变过程中的实时温度。

表 1 通孔铜泡沫试样参数

试样编号	孔密度/ m^{-1}	孔隙率
A	315	0.90
B	1 181	0.90
C	1 181	0.97



1~4:测点位置

图 1 试样 A 实物图

1.2 实验系统

本实验为研究金属泡沫孔结构参数及自然对流对蓄冰过程的影响,搭建了一套相变换热实验系统,如图 2 所示,主要包括相变换热装置、恒温水箱、数据采集器及拍摄设备,其中相变换热装置由聚氨酯泡沫、铜基板、铜片、金属泡沫及竖向有机玻璃框组成,铜基板内含有通道可供冷却介质流通,铜基板嵌在聚氨酯泡沫(导热系数为 $0.02 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)内以减少冷量损失。为了方便更换金属泡沫试样并使其紧密接触,采用与金属泡沫试样大小一致且厚度

为 2 mm 的铜片分别与铜基板和金属泡沫试样粘在一起,为了降低接触热阻,采用导热胶(导热系数为 $25 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)作为粘接剂。其中铜基板与铜片之间安装了 3 根 K 型热电偶,用于采集铜基板壁面温度,铜泡沫安装于上部开口的有机玻璃框内(侧壁厚 20 mm),并在有机玻璃框外侧包裹保温棉(保温棉导热系数为 $0.02 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)以减少冷量损失。实验过程中采用高清相机对相界面进行实时拍摄来记录相界面位置。恒温水箱采用乙醇溶液作为冷媒,提供 -15°C 的低温冷却边界。

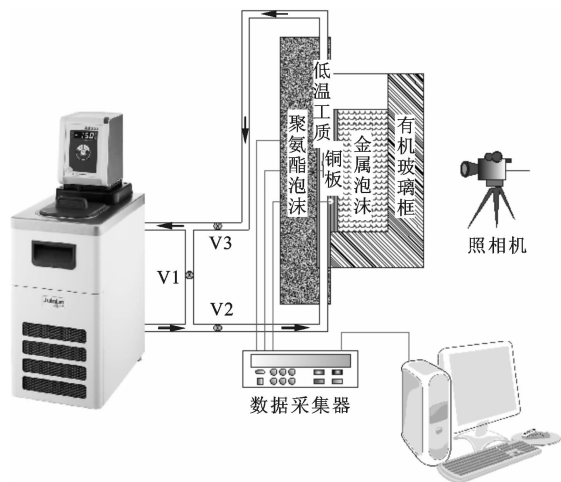


图2 实验装置示意图

实验前关闭阀门 V2、V3,开启 V1,向有机玻璃框内加水至恰好淹没铜泡沫,开启恒温水浴使温度降低到 -15°C 。水浴温度稳定后打开温度采集器开始采集温度数据(时间间隔 30 s),此时打开阀门 V2、V3,关闭 V1,使低温冷媒由下而上流过铜基板并拍摄第一张照片,由于结冰较慢,拍摄间隔不宜太短,此后每隔 6 min 拍摄一次以记录相界面位置。

2 结果讨论

2.1 蓄冰过程壁面温度变化

图3给出了对试样C进行实验时的基板温度变化情况,由图可知,在实验开始前,铜基板维持初始温度不变。实验开始时,打开阀门 V2、V3,关闭 V1 后, -15°C 的低温冷媒乙醇溶液流经铜基板,铜基板表面温度急剧下降随后再缓慢下降趋于平稳,最终稳定温度高于 -15°C 。这是由于通入低温冷媒之后,基板初始温度与低温冷媒温差很大,因此基板温度急剧下降,随着基板温度不断下降,两者之间温差不断减小,因此基板温度下降速率变慢直至最后趋于稳定。最终热电偶测得的基板温度高于水浴

设定温度(-15°C),其主要原因为:测试腔内水凝固放出大量的热,这部分热量均由冷却介质带走,所以最终冷却介质的温度高于设定值(-15°C)。

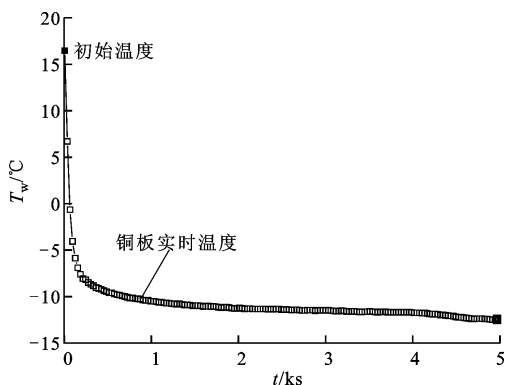


图3 铜基板温度随时间的变化(试样C)

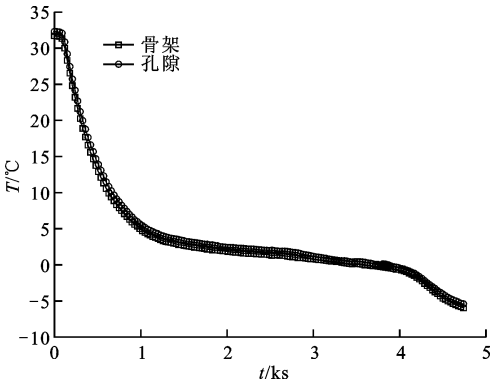
2.2 局部热平衡实验验证

基于体积平均理论的多孔介质模型能够很好地模拟多孔介质内嵌相变材料的凝固/融化过程,多孔介质骨架表面与相变材料之间的热平衡情况是使用该方法的基础。已有实验研究表明^[14-15],在多孔介质内嵌石蜡类熔化相变过程中,骨架表面与内嵌石蜡存在温差,基于局部非热平衡模型的双能量方程能够更好地预测相变过程。

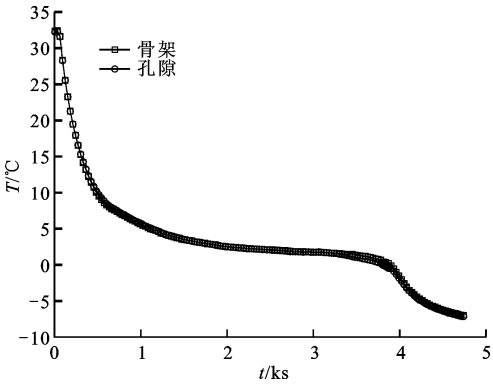
对于本文研究的金属泡沫强化凝固过程而言,为了探究孔隙尺度局部热平衡情况,分别在金属杆表面和相变材料内布置热电偶监测其实时温度,其中布置在骨架上的热电偶采用导热胶将感温头固定在泡沫骨架上。图4展示了试样A的金属泡沫骨架表面及相变材料温度变化情况,可将温度曲线分为3段:开始时(第1阶段)温度急剧下降,主要为显热蓄冷阶段;随后(第2阶段)温度缓慢下降,主要为潜热蓄冷阶段;待相变结束后,再次以显热继续蓄冷(第3阶段)。从位置1、2两处的温度曲线可以看出,两组测点位置金属骨架表面温度和孔隙内嵌相变材料温度一致,从实验角度证实了低孔密度(315 m^{-1})下局部热平衡模型的可行性,这为单能量方程应用于低孔密度(315 m^{-1})下金属泡沫内的凝固过程提供了实验依据。

2.3 不同孔隙率对蓄冰过程的影响

图5展示了相同孔密度(1181 m^{-1})、不同孔隙率(0.90、0.97)的通孔铜泡沫在二维蓄冰过程中的实时相界面位置,由图可知:孔隙率越小,相同时间内相界面移动越快,凝固速率越大。这是因为孔隙率小的铜泡沫所包含的铜更多,能容纳的水体积更小,而铜的导热系数比水大,使整个蓄冷单元的热扩



(a)位置 1



(b)位置 2

图 4 骨架表面和相变材料内部实时温度

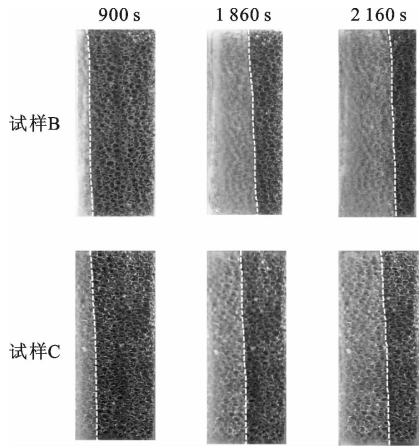


图 5 不同孔隙率时相界面的变化情况

散率更大;同时,更少的水所需热量较少,故孔隙率越小,结冰速率越快,相同时间内相界面生长越多。

由图 5 可见,凝固过程中相界面出现不同程度的倾斜弯曲,泡沫下部冰层较上部厚,说明在凝固过程中,液相区域中存在自然对流。液相区靠近相界面处液体温度较低向下运动,而外侧温度相对较高的液体向上运动,从而在上部形成涡流区,且上部温度较高,故在自然对流的作用下,液相区上部区域结冰缓慢,最终使得相界面发生倾斜。

图 6 给出了相同孔密度($1\,181\,\text{m}^{-1}$)、不同孔隙率(0.90、0.97)条件下,蓄冰过程中结冰率 f_s (冰占总体积的比例)随时间的变化过程,其中以纯水凝固过程作为对比。由图可知:相同时间内,所用铜泡沫孔隙率越小,蓄冰量越大,蓄冰过程所需时间越短;与不含铜泡沫的工况(纯水)相比,在蓄冰过程中加入铜泡沫,前期结冰率相差较小,而蓄冰后期,纯水结冰速率大大降低,加入铜泡沫的工况结冰速率下降很少。加入铜泡沫后,结冰所需时间与纯水工况相比减少为 48.86%(孔密度为 $1\,181\,\text{m}^{-1}$,孔隙率为 0.90)和 60.97%(孔密度为 $1\,181\,\text{m}^{-1}$,孔隙率为 0.97)。这说明铜泡沫可使蓄冰后期传热得到强化,大大减少蓄冰时间,提高蓄冰效率。

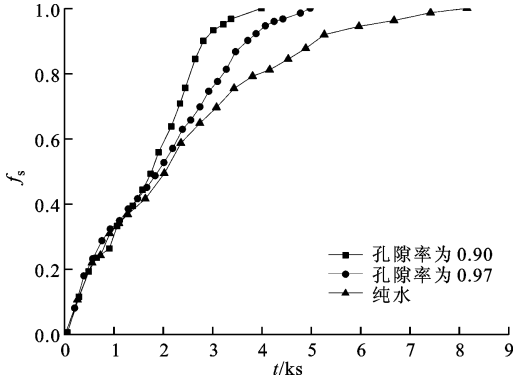


图 6 不同孔隙率时结冰率随时间的变化

2.4 不同孔密度对蓄冰过程的影响

孔密度是描述金属泡沫的另一个重要参数,一般以每英寸孔的个数(pore per inch,PPI)来表示,本文中均采用国际单位制 m^{-1} 。相同孔隙率(0.90)、不同孔密度(315 、 $1\,181\,\text{m}^{-1}$)下的相界面变化情况如图 7 所示。由图 7 可知:两组实验相界面形状基本一致,相界面位置大致相同;由图 8 可知,相同孔隙率、不同孔密度下的两种工况结冰率变化

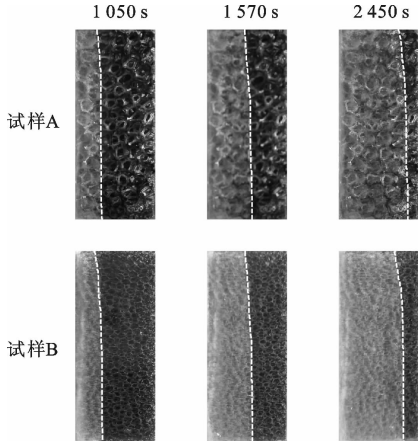


图 7 不同孔密度时相界面的变化情况

情况基本一致,说明在相同孔隙率条件下,孔密度对结冰过程影响很小。与纯水相比,加入金属泡沫后完全凝固所需时间与纯水工况相比减少为 47.54% (孔密度为 315 m^{-1} , 孔隙率为 0.90) 和 48.86% (孔密度为 1181 m^{-1} , 孔隙率为 0.90)。其主要原因如下:孔密度仅表示泡沫孔径不同,而孔隙率相同表明铜泡沫中铜与空隙所占体积之比相同,即铜的材料相同,金属泡沫-相变材料复合结构的有效导热系数一致,故在孔隙率相同时,孔密度的变化对蓄冰过程的影响可忽略不计。

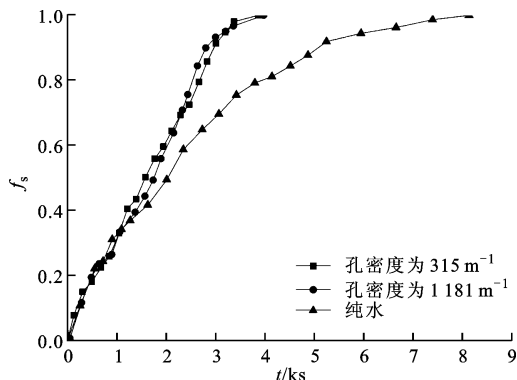


图8 不同孔密度时结冰率随时间的变化

3 结 论

本文针对通孔铜泡沫内嵌相变材料的凝固过程开展了实验研究,讨论了孔结构参数(孔隙率和孔密度)对凝固过程的影响,对未凝固相内自然对流对相变传热的影响做了系统分析,主要结论如下。

(1)与不加铜泡沫的工况相比,加入铜泡沫形成的复合结构能改善蓄冰后期传热恶化现象,使整个蓄冰过程都能保持较高的传热速率,缩短蓄冰周期,降低能耗。

(2)铜泡沫的孔隙率对结冰过程影响较大,而孔密度对结冰过程影响可忽略不计,孔隙率越低,凝固层生长越快,完全凝固时间越短。

(3)可视化结果表明,未凝固相局部自然对流导致凝固相界面发生倾斜,呈现下部略快于上部的凝固界面。

参考文献:

[1] 钟亮, 潘阳. 加金属丝水平单圆管蓄冰数值模拟 [J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(5): 35-40.
ZHONG Liang, PAN Yang. Ice storage numerical simulation of horizontal single circular tube added with wire [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2011, 28(5): 35-40.

[2] 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.

[3] 李文强, 屈治国, 陶文铨. 金属泡沫内固-液相变数值模拟研究 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(1): 141-144.
LI Wenqiang, QU Zhiguo, TAO Wenquan. Numerical study of solid-liquid phase change in metallic foam [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(1): 141-144.

[4] 贺万玉, 闫全英. 熔融盐相变储热材料 [J]. 材料导报, 2015(S1): 128-130.
HE Wanyu, YAN Quanying. Molten salt as a phase change material [J]. Materials Review, 2015(S1): 128-130.

[5] 袁艳平, 向波, 曹晓玲, 等. 建筑相变储能技术研究现状与发展 [J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(3): 585-598.
YUAN Yanping, XIANG Bo, CAO Xiaoling, et al. Research status and development on latent energy storage technology of building [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(3): 585-598.

[6] 杨肖虎, 白佳希, 卢天健. 通孔金属泡沫渗透率解析模型 [J]. 力学学报, 2014, 46(6): 982-986.
YANG Xiaohu, BAI Jiaxi, LU Tianjian. A simplistic analytical model of permeability for open-cell metallic foams [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 46(6): 982-986.

[7] 杨肖虎, 邝九杰, 白佳希, 等. 高孔隙率通孔金属泡沫有效导热系数的实验和理论研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(4): 79-84.
YANG Xiaohu, KUANG Jiujie, BAI Jiaxi, et al. Experimental and analytic investigations for effective thermal conductivity in high porosity metallic foams [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(4): 79-84.

[8] 孟锋, 安青松, 郭孝峰, 等. 蓄热过程强化技术的应用研究进展 [J]. 化工进展, 2016, 35(5): 1273-1282.
MENG Feng, AN Qingsong, GUO Xiaofeng, et al. A review of process intensification technology in thermal energy storage [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(5): 1273-1282.

[9] 蒋玉龙, 张素军, 李菊香. 泡沫材料冰蓄冷板融化过程的研究 [J]. 制冷学报, 2015, 36(5): 65-73.
JIANG Yulong, ZHANG Sujun, LI Juxiang. Investi-

- gation on melting process of ice cold-plate with porous material [J]. *Journal of Refrigeration*, 2015, 36(5): 65-73.
- [10] 施娟, 陈振乾, 施明恒. 蓄冰球内多孔泡沫金属对流体冻结传热影响的试验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(8): 1395-1397.
- SHI Juan, CHEN Zhenqian, SHI Mingheng. Experimental study on the effect of the porous metal foams in ice ball on the freezing heat transfer of fluid [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(8): 1395-1397.
- [11] 杨秀, 陈振乾. 蓄冰球中填充泡沫铝的融化相变传热过程的数值模拟 [J]. *化工学报*, 2008, 59(S2): 139-142.
- YANG Xiu, CHEN Zhenqian. Numerical simulation on melting phase change heat transfer in ice storage ball filled with aluminum foam [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2008, 59(S2): 139-142.
- [12] YANG X H, FENG S S, ZHANG Q C, et al. The role of porous metal foam on the unidirectional solidification of saturating fluid for cold storage [J]. *Applied Energy*, 2017, 194: 508-521.
- [13] FENG S S, ZHANG Y, SHI M, et al. Unidirectional freezing of phase change materials saturated in open-cell metal foams [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 88: 315-321.
- [14] 王杰利, 屈治国, 李文强, 等. 封装有相变材料的金属泡沫复合散热器实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(2): 295-298.
- WANG Jieli, QU Zhiguo, LI Wenqiang, et al. Experimental study of hybrid heat sink sintered with metal foams filled with phase change materials [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(2): 295-298.
- [15] ZHANG P, MENG Z N, ZHU H, et al. Melting heat transfer characteristics of a composite phase change material fabricated by paraffin and metal foam [J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 1971-1983.

(编辑 荆树蓉)

(上接第19页)

- [15] 刘敏珊, 宫本希, 董其伍. 螺旋扁管的换热性能研究 [J]. *石油机械*, 2008, 36(2): 22-25.
- LIU Minshan, GONG Benxi, DONG Qiwu. Research on exchanger performance of spiral oval twisted tube [J]. *China Petroleum Machinery*, 2008, 36(2): 22-25.
- [16] 盘彩美, 王文昊, 崔晓钰. 螺旋扭曲椭圆管换热器壳程数值模拟 [J]. *能源研究与信息*, 2011, 27(2): 99-104.
- PAN Caimei, WANG Wenhao, CUI Xiaoyu. Numerical simulation of shell-side heat transfer in the spiral elliptical-tube heat exchanger [J]. *Energy Research and Information*, 2011, 27(2): 99-104.
- [17] 管屏, 方安涛, 卢玫. 螺旋扭曲扁管管外传热性能数值模拟 [J]. *轻工机械*, 2016, 34(6): 16-20.
- GUAN Ping, FANG Antao, LU Mei. Numerical simulation on heat transfer performance of laminar flow outside twisted oval tube [J]. *Light Industry Machinery*, 2016, 34(6): 16-20.
- [18] 杨留, 朱冬生, 李霞, 等. 扭曲管换热器壳程传热与降压性能的数值模拟 [J]. *石油化工设备技术*, 2014, 42(4): 32-36.
- YANG Liu, ZHU Dongsheng, LI Xia, et al. Numerical simulation of shell side heat transfer and pressure drop characteristics of twisted tube heat exchanger [J]. *Chemical Engineering*, 2014, 42(4): 32-36.
- [19] 孟继安, 李志信, 过增元, 等. 螺旋扭曲椭圆管层流换热与流阻特性模拟分析 [J]. *工程热物理学报*, 2002, 23: 118-120.
- MENG Jian, LI Zhixin, GUO Zengyuan. Simulation and analysis on laminar flow and heat transfer in twisted ellipse-tube [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2002, 23: 118-120.
- [20] 张杏祥, 魏国红, 桑芝富. 螺旋扭曲换热器传热与流阻性能试验研究 [J]. *化学工程*, 2007, 35(2): 18-25.
- ZHANG Xingxiang, WEI Guohong, SANG Zhifu. Experimental research of heat transfer and flow friction properties in twisted tube heat exchanger [J]. *Chemical Engineering*, 2007, 35(2): 18-25.

(编辑 荆树蓉)