填充泡沫镍对固液相变过程的影响

徐伟强 袁修干 邢玉明

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为了改善固液相变蓄能装置的空穴分布及传热性能, 在理论研究基础上设计制造了填充泡沫镍的固液相变蓄热容器, 与未填充泡沫镍的蓄热容器一同进行了相变蓄热实验, 利用铂电阻(Pt100)和数据采集模块(ADAM24000)测得了各蓄热容器的温度变化数据, 实验后对各容器进行了 CT(Computed Tomography)扫描, 得到了容器内部的空穴分布图像. 通过对比研究两种容器的温度变化和空穴分布, 证明了填充泡沫镍能够有效改善固液相变过程中的空穴分布和传热性能, 研究结论对于固液相变蓄热技术的应用具有一定指导意义.

关 键 词: 泡沫镍; 空穴分布; 固液相变; 蓄热

中图分类号: TK 02; TK 124

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2009) 10-1197-04

Effect of embedding nickel foam on solid-liquid phase change

Xu Weiqiang Yuan Xiugan Xing Yuming

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

Abstract: To improve the void distribution and thermal performance of phase change thermal storage devices, thermal storage containers embedded with nickel foam cores were designed and manufactured based on the theoretical research. Phase change experiments were carried out with those containers, as well as containers without nickel foam, and the temperature variations of containers were tested and saved using platinum resistance thermocouples (Pt100) and data acquisition modules (ADAM24000). Void distributions of those containers were imaged by the computed tomography (CT) instrument after the experiments. The results of two kinds of containers were compared with each other, and the improvements of embedding nickel foam were testified both in void distribution and thermal performance of solid-liquid phase change process. The research findings could provide some values for the application of solid-liquid phase change thermal storage.

Key words: nickel foam; void distribution; solid-liquid phase change; heat storage

固液相变蓄能已成为低温蓄冷和高温蓄热领域的重要技术, 有效控制和强化相变传热过程是其应用中的关键问题. 国内外研究人员在强化传热方面开展了大量工作, 包括使用肋化容器, 在 PCM(Phase Change Materials)中添加高导热性结构等, 都不同程度提高了蓄能装置的传热效果[1-6]. 然而, 除了 PCM 的导热系数, PCM 内的空穴分布也是影响蓄热装置传热的重要因素. 相变时 PCM 的密度变化使其内部产生空穴, 并由此造成局部热阻和应力集中, 严重影响蓄热装置的传热性能和结构可靠性. 因此固液相变过程的空穴分布及其造成的影响成为亟待研究的问题, 对固液相变蓄热技术的进步和完善有重大意义.

泡沫金属是一种均匀多孔结构的新型功能材料, 具有密度小、孔隙率高、比表面积大等特点. 将其填充于相变蓄热装置中不仅能提高装置的传热性能, 还能有效分散 PCM 中空穴的分布, 从而改善装置的整体热性能和可靠性.

目前对泡沫金属填充相变蓄热装置的相关研究主要局限于强化传热方面[7-8], 本文从强化传

收稿日期: 2008-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50276001, 50876004)

作者简介: 徐伟强(1981-), 男, 浙江新昌人, 博士生, xwq@ase.buaa.edu.cn.

热和空穴分布两方面研究了填充泡沫镍对相变蓄热装置整体性能的影响. 在理论分析的基础上设计制造了填充泡沫镍的相变蓄热容器和常规蓄热容器, 通过相变蓄热实验及容器内部空穴分布的CT(Computed Tomography)扫描, 对两种蓄热容器的传热性能和空穴分布进行了对比分析, 验证了填充泡沫金属在分散空穴分布和提高传热效果上的显著影响.

1 理论基础

1.1 复合 PCM 有效导热系数的计算

泡沫金属的结构和传热机理复杂, 而填充泡沫金属后的复合 PCM 的有效导热系数更难精确计算. 目前的理论研究基本上把泡沫金属内的传热模型单元简化为以孔隙为中心, 由 12根圆杆构成的规则正立方框架结构, 并使其孔隙率与实际孔隙率相同, 孔隙内为 PCM. 利用/热电等效回路原理0计算该模型单元的有效导热系数.

根据文献[9]的研究结论, 填充泡沫金属后的复合 PCM 的有效导热系数可以按下式计算:

$$k_c = k_m \frac{k_r + 2k_m - 2E(k_m - k_r)}{k_r + 2k_m + E(k_m - k_r)} \quad (1)$$

式中, k_c为复合 PCM 的有效导热系数; k_r为 PCM 的导热系数; k_m 为泡沫金属基材的导热系数; E为泡沫金属的孔隙率.

以 60#石蜡/泡沫镍复合 PCM 为例计算有效导热系数, 其中金属镍的导热系数为 90.70W/(m·K), 固、液态石蜡的导热系数分别为 0.558W/(m·K)和 0.335W/(m·K), 不同孔隙率泡沫镍对应的固、液态复合 PCM 的有效导热系数 k_{cs}和 k_{cl}如表 1所示.

表 1 复合 PCM 的有效导热系数

E	k_{cs}/(W·(m·K)$^{-1}$)	k_{cl}/(W·(m·K)$^{-1}$)
0.95	3.623	3.404
0.9	6.792	6.578
0.8	13.469	13.265
0.7	20.637	20.445
0.6	28.353	28.176

计算结果显示, 填充泡沫镍能显著提高 PCM 的导热系数, 且复合 PCM 的有效导热系数随着泡沫镍孔隙率的减小而增大.

1.2 毛细力与泡沫镍孔径的关系

泡沫金属能够产生的最大毛细压头主要与毛细孔的孔径和液体的表面张力系数有关, 即

$$\Delta P_c = \frac{2R}{r} \quad (2)$$

式中, ΔP_c为毛细压头; R为液体的表面张力系数; r为毛细孔半径.

2 相变蓄热装置的设计制造

本次实验采用了铝合金容器封装 60#石蜡作为相变蓄热装置. 容器采用同心套管形式, 由内外壁和上下端盖焊接组成, 如图 1所示. 多个容器的内壁首尾相接形成传热工质的通道.

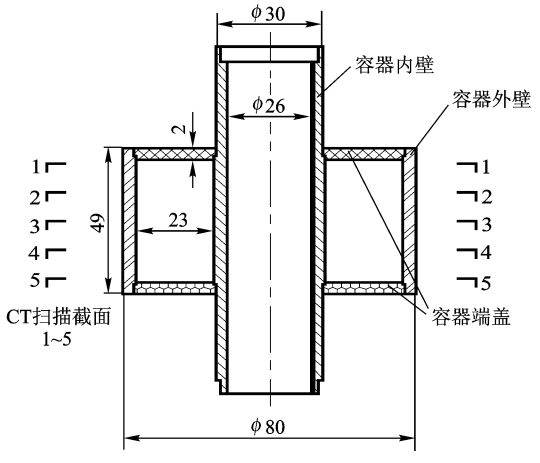


图 1 蓄热容器结构示意图

为了对比验证填充泡沫镍对固液相变过程中空穴分布的影响, 本文设计制造了 4个结构尺寸相同的蓄热容器, 其中 1号和 3号、2号和 4号容器分别作为两组对比实验件, 填充情况见表 2.

表 2 实验容器参数列表

容器号	填充泡沫镍	容器质量/g	石蜡质量/g	总质量/g
1	是	242.5	105.5	348.0
2	是	241.5	85.0	326.5
3	否	208.1	105.5	313.6
4	否	208.2	85.0	293.2

注: 1、2号容器的容器质量包含泡沫镍质量.

本文采用连续带状泡沫镍作为填充材料, 规格为: 孔隙率≥95%, 孔径 0.5mm, 厚度 1.6mm, 将其裁剪并卷制成芯体后, 填充于蓄热容器内.

采用大孔隙率泡沫镍能使单位容积内填充更多的 PCM; 小孔径则提供更大的毛细压头, 更好地分散空穴分布; 另外相对于超厚泡沫镍制作整体式芯体, 连续带状泡沫镍卷制芯体不仅降低成本和加工难度, 且改善了充装 PCM 的工艺性能.

容器制造时, 先加工完成内外壁和上下端盖备用, 再将内外壁和下端盖焊装成开口容器, 然后给容器填充泡沫镍芯体, 充装石蜡, 最后在真空环境下用上端盖封闭容器.

3 实验系统及实验内容

实验在北京航空航天大学人机与环境工程实验室进行, 实验系统主要由高压供气设备、空气加

温设备、换热器、即热式热水器、实验件系统及温度采集系统组成, 图 2为相变蓄热实验系统示意图. 在 1~ 4号每个容器表面的顶部、中部和底部各布置一个 Pt100铂电阻, 各容器间管壁上也各布置一个 Pt100铂电阻, 全部 15个铂电阻通过研华数据采集模块 ADAM24000与计算机相连, 由组态王软件进行温度的实时观测和记录.

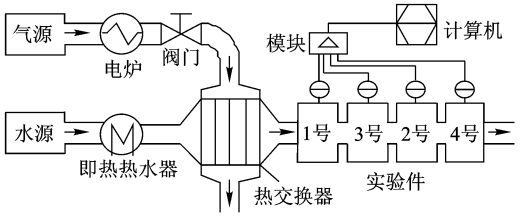


图 2　相变蓄热实验系统示意图

相变蓄热实验在常温常压下进行, 分为蓄热和放热两个过程. 蓄热过程中, 用即热式热水器和高温高压热空气共同作用将水加热至 80 e 后通过并加热容器内壁, 使容器内 PCM 融化; 等到容器内 PCM 完全融化后转为放热过程, 关闭即热式热水器和空气加温设备, 改由常温的自来水通过容器内壁并带走热量, 使容器内 PCM 凝固. 整个过程通过组态王软件实时监测和记录温度数据.

4　实验结果及分析

4 1　相变蓄放热实验

实验中组态王软件以 1 s的频率采集了容器表面 12个温度测点 $T_{i,j}$和管壁上 3个测点 $T_{w,j}$的数据, 其中下标 i= 1, 2, 3, 4代表容器号; 下标 w 代表管壁; 下标 j= 1, 2, 3代表测点号. 根据实验数据绘制的温度变化曲线如图 3~图 5所示.

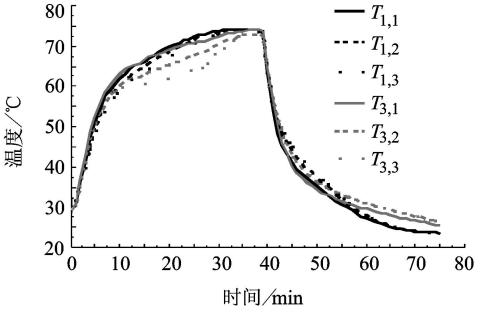


图 3　1号、3号容器各测点温度变化曲线

图 3显示了 1号和 3号容器上测温点的温度变化曲线; 图 4显示了 2号和 4号容器上测温点的温度变化曲线; 图 5直观地显示了各容器的壁面最大温差 (ΔT_i, i= 1, 2, 3, 4)随时间的变化情况. 管壁上 3个温度测点 $T_{w,j}$用以监测各容器内壁温度的差异是否过大, 以保证实验对比的合理性. 数据显示整个实验过程中 $T_{w,1}$和 $T_{w,2}$, $T_{w,2}$和 $T_{w,3}$的平均温差分别为 0. 225 e 和 0. 272 e , 据此假设 4个容器的内壁温度 (即蓄放热实验条件) 始终相等.

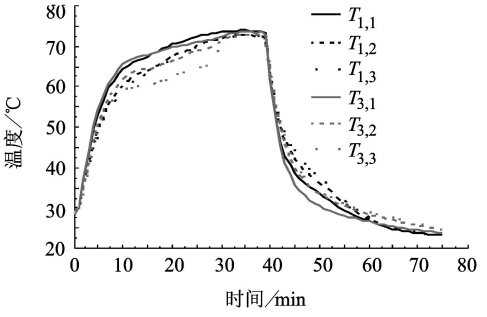


图 4　2号、4号容器各测点温度变化曲线

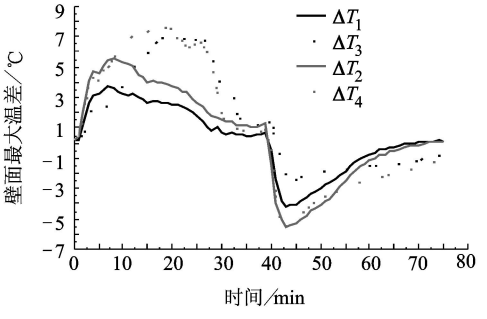


图 5　1~ 4号容器壁面最大温差变化曲线

对比 1号和 3号, 2号和 4号这两对充装相同质量石蜡的容器的温度曲线形态发现以下特征: ¹ 1号和 2号容器的温度变化分别比 3号和 4号容器更快, 能更早达到蓄热和放热过程的平衡温度, 说明填充泡沫镍提高了蓄热容器内的导热系数, 从而缩短了相变过程的时间. º 整个实验过程中 1号、2号容器的温差分别比 3号、4号容器的温差小, 说明填充泡沫镍使得蓄热容器内的温度场分布更加均匀. » 3号、4号容器在蓄热过程中的温度升高趋势在石蜡相变温度点附近放缓, 尤其是容器底部温度出现明显的平台期, 说明相变过程中的固液相变界面比较集中, 相变过程随相变界面比较缓慢地推进; 而 1号、2号容器在蓄热过程中的温度升高趋势比较连续, 没有在石蜡相变温度点附近出现平台, 说明填充泡沫镍使得蓄热容器内的固液相变界面更加分散, 相变过程更加迅速.

4 2　空穴分布的 CT成像

蓄放热实验后对各容器内的空穴分布进行 CT扫描成像, 采用的设备为 450 kV 工业 CT机, 检测精度指标为: 空间分辨力 3. 3线对 /mm, 密度分辨力优于 0. 3%, 具体方案为对每个容器内的 5个水平面 (见图 1)扫描成像, 分别为距离容器底部 39. 5, 49. 5, 59. 5 (容器对称面), 69. 5和 79. 5mm 5个高度, 成像结果如图 6~图 9所示.

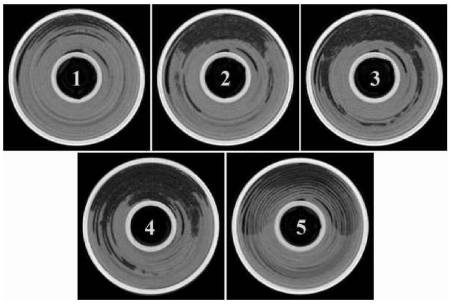


图 6 1号容器空穴分布 CT图像

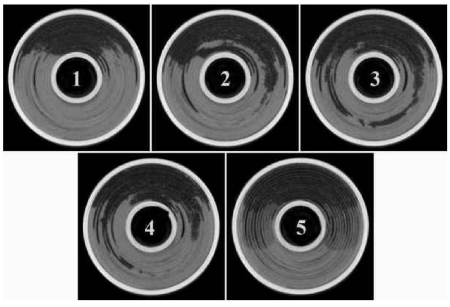


图 7 2号容器空穴分布 CT图像

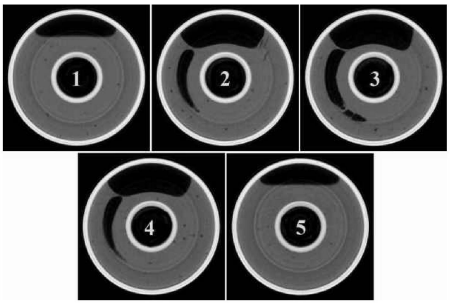


图 8 3号容器空穴分布 CT图像

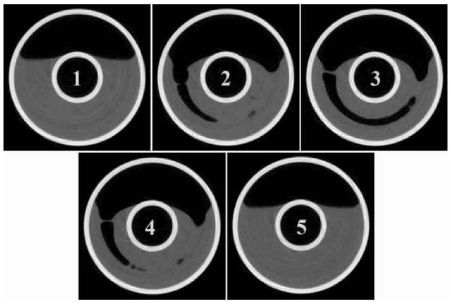


图 9 4号容器空穴分布 CT图像

通过对比各容器空穴分布图像发现以下特征: ¹ 由于重力作用, 各容器内的空穴分布均比较靠近实验安装形态对应的容器上部. º 由于容器内外壁和上下侧壁的共同导热作用, 各容器内的空穴分布均呈现靠近上下侧壁处比水平中间位置处少, 靠近内外壁处比径向中间位置处少的规律. » 由于泡沫镍内毛细通孔对液态 PCM产生的毛细抽吸作用, 1号、2号容器内部的空穴分布明显比 3号、4号容器分散得多.

5 结束语

本文通过相变蓄放热试验研究对比了两种蓄热容器的传热性能, 并采用 CT技术直观而形象地显示了两种蓄热容器内空穴的分布状况, 证明了填充泡沫镍能够明显分散固液相变过程中的空穴分布, 并提高传热系数、改善容器内的温度均匀性. 空穴的分散还降低了蓄热装置产生/热斑0、/热松脱0现象的可能, 提高了可靠性. 研究成果对相变蓄热技术的完善和推广具有积极意义.

参考文献 (References)

[1] Humphries W R. Performance of finned thermal capacitor[R]. NASA TN D2769, 1974

[2] Zhang Y W, Faghri A. Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage system by using the internally finned tube [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39 (15): 3165- 3173

[3] Velraj R, Seeniraj R V. Heat Transfer studies during solidification of PCM inside an internally finned tube[J]. Journal of Heat Transfer, 1999, 121(2): 493- 497

[4] Bugaje IM. Enhancing the thermal response of latent heat storage systems [J]. International Journal of Energy Research, 1997, 21(9): 759- 766

[5] 张寅平, 胡汉平, 孔祥冬, 等. 相变储能 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996: 78- 80
Zhang Yinping, Hu Hanping, Kong Xiangdong, et al. Phase change thermal storage [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1996: 78- 80 (in Chinese)

[6] Fukai J, Kanou M, Kodama Y, et al. Thermal conductivity enhancement of energy storage media using carbon fibers[J]. Energy Conversion and Management, 2000, 41(14): 1543- 1556

[7] 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. 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. Application of aluminum foam in the phase change storage device [C] // Satellite Thermal Control Technology Seminar Papers. Beijing: The PLA's General Armament Department of Satellite Technologies Group, 2003: 297- 305 (in Chinese)

[8] 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)

[9] 祁先进. 金属基相变复合蓄热材料的实验研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学材料与冶金工程学院, 2005
Qi Xianjin. Experimental study on composite heat storage material with metal and molten[D]. Kunming: The Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, 2005 (in Chinese)

(编 辑: 李 晶)