文章编号:0253 - 4339(2016) 06 - 0061 - 05 **doi**:10.3969/j.issn.0253 - 4339.2016.06.061

正十八烷/泡沫相变复合材料蓄热实验研究

张靖驰^{1,2} 盛强¹ 童铁峰¹ 任维佳¹

(1 中国科学院太空应用重点实验室 中国科学院空间应用工程与技术中心 北京 100094;2 中国科学院大学 北京 100049) 摘 要 通过实验对相变复合材料的相变过程进行研究,将相变材料正十八烷(C18)分别填充到泡沫铜和泡沫碳中来提高相变 材料的导热性能,采用差示扫描量热法(DSC)分析了正十八烷相变材料的热物性。利用相变蓄热装置对三种不同材料(C18、 C18/泡沫碳、C18/泡沫铜)进行蓄放热对比实验,记录温度测试数据,分析这三种不同材料的温控性能与蓄热能力,并与正十八 烷的结果对比。结果表明:泡沫材料的填充大幅提高相变材料的温控性能,使蓄热装置温度分布更均匀。 关键词 蓄热;相变;潜热;正十八烷;泡沫碳 中图分类号:TB34; TK02 文献标识码: A

Thermal Storage Experiment of N-octadecane/Foam Phase Change Composite

Zhang Jingchi^{1,2} Sheng Qiang¹ Tong Tiefeng¹ Ren Weijia¹

(1. Key Laboratory of Space Utilization, Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100094, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The experimental investigation on the phase change processes had been carried out. N-octadecane (C18) was used as latent heat storage phase change material (PCM), in which copper foams and carbon foams were embedded to enhance the heat transfer. The thermal properties of C18 were measured by differential scanning calorimetry(DSC). An experimental investigation on three thermal storage units (TSUs) with different kinds of materials filling state (C18, C18/carbon foam, C18/copper foam) had been carried out. The temperature data of TSUs had been recorded and analyzed. Compared to the results of pure C18 TSU, the effect of the foam materials on phase change heat transfer was very significant and made the temperature distribution more uniform.

Keywords thermal storage; phase change; latent heat; n-octadecane; carbon foam

随着电子元器件集成度越来越高,芯片工作时会 产生很高的热流密度,对电子元器件性能产生有害影 响。为克服电子元件短时高功耗的问题,可应用相变 材料蓄热控温,保证电子元件在最佳的工作温度附近 工作^[1]。相变材料在相变过程中伴随着大量的相变 潜热,能够吸收或释放大量的能量且相变过程近似等 温^[2],这一特性使其适合于周期性工作的电子元件 的热控^[3]。石蜡类相变材料具有相变潜热高、化学 性质稳定、几乎无过冷和相变分离现象、无腐蚀性、价 格低等优点,且品种繁多,熔点跨度大,可以涵盖不同 的电子元件工作温度范围^[4-5]。

然而,石蜡类相变材料存在导热率低的缺点,这 是限制其潜热蓄热广泛应用的重要原因^[6-7]。常用 的强化相变材料导热能力的措施有:在相变材料中添 加金属填料、石墨、肋片、进行胶囊封装、将不同的相 变材料进行组合等^[8]。在几种相变材料强化传热的 方法中,高孔隙度的多孔介质泡沫材料由于高导热性 能和面密度被普遍认为有很好的应用前景^[9]。当多 孔介质泡沫材料和相变材料复合成定形相变材料后, 泡沫材料本身的毛细力和表面张力会防止熔化后的 液态相变材料出现泄漏^[10]。采用高导热的泡沫材料 来改善相变材料传热性能,促进相变蓄热能能够真正 得到广泛利用^[11-12]。相变复合材料在蓄热过程中不 仅利用了相变材料的相变潜热,还利用了相变材料和 泡沫材料的显热,泡沫材料的填充同时改善了空穴位 置分布的控制^[13-14]。

泡沫碳是一种在石墨基体中均匀分布大量连通 孔洞的新型高导热材料。相比于常见的膨胀石墨,泡

收稿日期:2016年2月22日

基金项目:国家自然科学基金(50876004)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50876004).)

沫碳有孔密度大、通孔率高、能够维持自身形状结构 等特点,其导热率是泡沫铜的5倍左右^[15-16]。采用 差示扫描量热法(DSC)分析了正十八烷(C18)的相 变温度与潜热,通过热脉冲法测量了C18/泡沫碳相 变复合材料的导热系数。分别制备出C18、C18/泡沫 碳、C18/泡沫铜相变蓄热装置,进行蓄、放热实验,分 析实验结果,对比研究不同相变材料的蓄热装置的储 热、传热性能。

1 实验方法

1.1 实验材料

正十八烷为国药化学公司生产,纯度≥99.0%; 泡沫铜为吉林卓尔科技股份有限公司生产,孔隙率分 别为87%和94%;泡沫碳为航天材料及工艺研究所 提供,孔隙率为81%。

1.2 实验准备

图 1 是相变蓄热装置结构示意图。相变蓄热装置(C18、C18/泡沫碳、C18/泡沫铜)的结构尺寸一致, 为 φ76 mm × 45 mm。薄膜电加热片紧密贴附在相变 蓄热装置的热源面,选用 8 支 Pt100 热电阻来测量相 变蓄热装置不同位置的温度分布情况,Pt100 热电阻 的测温误差为 ±0.1 ℃,分别测量热源面、热源面对 面的温度。使用保温海绵对蓄热体进行隔热包覆,减



(a) 泡沫碳



(b) 泡沫铜

图 1 蓄热装置结构 Fig. 1 Structure of thermal energy storage device

少外界环境对装置的热量交换,做到近似绝热条件。

图 2 为蓄热装置蓄热实验台示意图。蓄热装置 热源面上的薄膜电加热片功率为 25 W(热流密度 q =5.5 kW/m²),加热 30 min;断开电源,将相变蓄热 装置完全暴露在空气中,冷却至室温。数据采集板卡 采集相变蓄热装置表面瞬时温度,并录入计算机中, 数据采集频率为1 次/s。





Fig. 2 Schematic diagram of phase change thermal storage experimental set-up

2 实验结果

2.1 正十八烷热物性

DSC 实验使用的是德国耐驰仪器公司生产的差示扫描量热仪(Netzsch STA409PC),温升速率为3℃/min,温升范围为20~70℃,实验过程用高纯度氮气保护,待基线稳定后,获得相变材料热物性测试结果如图3所示,通过热重曲线可以看出,C18在相变过程中基本没有质量变化,通过DSC曲线可以看到,C18在熔化起始点出现在22.6℃,终止点在31.7℃,相变吸热峰值为28.1℃,存在明显的固-液相变过程,相变潜热值为225.3 kJ/kg。



图 3 正十八烷(C18)TG-DSC 测试曲线 Fig. 3 TG-DSC test curves of n-octadecane(C18)

2.2 相变复合材料热物性

泡沫复合相变材料室温下热物性参数如表 1 所示, C18/泡沫碳复合材料的导热系数为 123 W/(m·K),孔 隙率为 0.94 和 0.87 的 C18/泡沫铜导热系数分别为 8 W/(m·K)和 21 W/(m·K),而纯 C18 的导热系数 仅有 0.35 W/(m·K),泡沫材料对相变材料导热系数 的提升作用非常显著。另一方面,C18/泡沫碳复合 材料在导热系数、单位质量蓄热量的参数上均优于 C18/泡沫铜复合材料。

表 1 泡沫复合相变材料室温下热物性参数 Tab. 1 Thermophysical properties of foam composite phase change materials in normal temperature

| | C18/ | C18/ | C18/ |
|-----------------|------|-------|------|
| | 泡沫碳 | 泡沫铜 I | 泡沫铜Ⅱ |
| 孔隙率 | 0.81 | 0.87 | 0.94 |
| 密度/(kg/m³) | 1.05 | 1.81 | 1.29 |
| 导热系数/(W/(m•K)) | 123 | 21 | 8 |
| 单位质量蓄热量/(kJ/kg) | 158 | 93 | 140 |

2.3 蓄热实验

四组相变蓄热装置(C18、C18/泡沫碳、C18/泡沫 铜Ⅰ、Ⅱ)加热过程中热源面温度随时间的变化曲线 如图4所示。四组相变蓄热装置温度变化可以划分 为三个阶段:固相阶段,固-液两相阶段和液相阶段。 固相阶段,蓄热装置主要依靠材料的显热吸收热量; 在固-液两相阶段,蓄热装置主要依靠相变材料的潜 热吸收热量,C18/泡沫碳和 C18/泡沫铜相变蓄热装 置在此阶段出现了明显的温度平台期,温度控制在 33~38 ℃之间,而纯 C18 温度控制范围为40~45 ℃ 之间,泡沫相变复合材料对温度的控制更为优秀;在 液相阶段,石蜡完全熔化,蓄热装置主要依靠材料的 显热吸热,温度曲线斜率突然变大。

顶面温度随时间的变化曲线如图 5 所示。由于远离热源,顶面的温度较低,但四组曲线的变化趋势与热源面温度曲线基本相似。在相变蓄热过程中固-液两相阶段,两组泡沫相变复合材料的温升曲线变化 平稳,基本维持在 C18 相变点 28 ℃附近,而纯 C18 温升速率没有明显降低。这是由于纯 C18 的导热率 低,热量无法快速传递到 C18 内部区域,导致装置的 铝合金外壳温度快速上升。

2.4 不同孔隙率 C18/泡沫铜对比

对图 4 两种不同孔隙率的 C18/泡沫铜(孔隙率 分别为 87% 与 94%)蓄热装置进行蓄热实验分析。 可以看出在固-液两相阶段,孔隙率为 87% 的 C18/泡 沫铜对热源面温度控制的更为优秀。这是由于孔隙 率越低,复合材料的导热系数越高,热源面的热量能 够迅速转移到蓄热装置的其他位置,使温度分布更均 匀。然而,孔隙率为 87% 的 C18/泡沫铜蓄热时间却 更短,率先进入液相阶段,这是由于低孔隙率使相变 材料的填充量减少,蓄热能力降低。



图 4 加热过程中热源面温度随时间变化曲线 ($q = 5.5 \text{ kW/m}^2$)

Fig. 4 Heat source surface temperature variations of TSUs during the melting process ($q = 5.5 \text{ kW/m}^2$)



图 5 加热过程中顶面温度随时间变化曲线($q = 5.5 \text{ kW/m}^2$)

Fig. 5 Top surface temperature variations during

the melting process ($q = 5.5 \text{ kW/m}^2$)

2.5 温差对比

图 6~图 8 为不同热流密度下 C18/泡沫碳和 C18/泡沫铜蓄热装置温差随顶面温度变化曲线。可 以看出,温差随热流密度的增加而增加,q = 11.0 kW/m²的温差近似为q = 5.5 kW/m²的两倍。相变 过程可以分为三个阶段:固相阶段、固-液两相阶段和 液相阶段。固-液两相阶段温差突然上升,这是由于 热源面处的 C18 率先进入液相阶段,显热吸热导致 其温度上升较快,而其余区域仍处于相变阶段,温度 基本维持不变,故导致温差上升较快;而进入液相阶 段后,温差逐渐降低到和固相阶段相同的水平。从图 6、图 7、图 8 的对比可知,q = 11.0 kW/m² 的工况, C18/泡沫碳装置的温差基本控制在 12 K 以下,而 C18/泡沫铜的温差控制在 18 K 以下; q = 5.5 kW/m² 的工况, C18/泡沫碳装置的温差基本控制在 6 K 以下, 而 C18/泡沫铜的温差控制在 10 K 以下。C18/泡 沫碳装置温度分布更为均匀。













2.6 放热实验

— 64 —

图9 所示为在空气中冷却的蓄热装置热源面温 度随时间变化曲线。在相同冷却条件下,纯 C18 相 变蓄热装置热源面温度冷却至 20 ℃所需时间约为 16.5 h。泡沫相变复合材料蓄热装置热源面温度冷 却到 20 ℃所需时间约为 13.3 h,冷却时间比纯 C18 减少约 20%。



图 9 空气冷却过程中热源面温度随时间 变化曲线(q = 5.5 kW/m²)



3 结论

本文采用实验方法,制备了 C18、C18/泡沫碳、 C18/泡沫铜相变复合材料及其蓄热装置,在相同功 率下进行蓄热实验,对三种材料的蓄放热性能与温控 能力进行对比,得出如下结论:

1)泡沫相变复合材料温控能力更为优秀。由于 泡沫材料的骨架结构和填充率的因素使其换热面积 远大于纯相变材料,泡沫相变复合材料的传热性能更 强。在蓄热过程中,泡沫复合相变材料的升温速率明 显降低;在放热过程中,泡沫相变复合材料装置温度 恢复至室温的时间比纯相变材料装置更短。

2) C18/泡沫碳比 C18/泡沫铜有更优秀的温控能 力、更高的蓄热密度。C18/泡沫碳在蓄热过程能够 更有效地控制热源面温度,减小热源面与顶面的温 差,且由于其密度更小,适用于有轻质要求的领域。

3)泡沫材料的孔隙率越小,对温度控制能力越 优秀,但同时蓄热时间会越短。

参考文献

- [1] 赖艳华,吴涛,魏露露,等. 基于相变材料的电子元件的 散热性能[J]. 化工学报,2014,65(Suppl.1):157-161. (LAI Yanhua, WU Tao, WEI Lulu, et al. Thermal performance of electronic components based on phase change materials[J]. CIESC Journal, 2014, 65(Suppl.1):157-161.)
- [2] 张寅平,胡汉平,孔祥冬,等.相变贮能——理论和应用
 [M].合肥:中国科学技术大学出版社,1996:1-31.

- [3] 王哲斌,许淑惠,严颖. 石蜡相变蓄热过程数值模拟
 [J].北京建筑工程学院学报,2008,24(2):10-13,24.
 (WANG Zhebin, XU Shuhui, YAN Ying. Simulation of the heat transfer of melting process of paraffin[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2008,24(2):10-13,24.)
- [4] 陈爱英,汪学英,曹学增.相变储能材料的研究进展与应用[J].材料导报,2003,17(5):42-44,72. (CHEN Aiying, WANG Xueying, CAO Xuezeng. Research and application of phase change material(PCM) used as energy storing material[J]. Materials Review, 2003, 17(5):42-44, 72.)
- [5] 陶文博,谢如鹤. 有机相变蓄冷材料的研究进展[J].
 制冷学报,2016,37(1):52-59. (TAO Wenbo, XIE Ruhe. Research and development of organic phase change materials for cool thermal energy storage [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(1):52-59.)
- [6] Jegadheeswaran S, Pohekar S D. Performance enhancement in latent heat thermal storage system: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13 (9):2225-2244.
- [7] 张涛,余建祖,高红霞. 自然对流对泡沫金属复合相变储能的影响实验研究[J]. 制冷学报,2009,30(1):1-6. (ZHANG Tao, YU Jianzu, GAO Hongxia. Experiment on thermal conductivity enhancement for PCM embedded in metal foam[J]. Journal of Refrigeration, 2009,30(1):1-6.)
- [8] Fan L, Khodadadi J M. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1):24-26.
- [9] 盛强,邢玉明. Ba(OH)₂·8H₂O/泡沫铜相变复合材料的制备及传热性能[J].复合材料学报,2014,31(6): 1566-1572. (SHENG Qiang, XING Yuming. Preparation and heat transfer performance of Ba(OH)₂·8H₂O/copper foam phase change composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(6):1566-1572.)
- [10] Zhang Z, Fang X. Study on paraffin/expanded graphite composite phase change thermal energy storage material
 [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(3): 303-310.

- [11] 李夔宁,郭宁宁,王贺.改善相变材料导热性能研究综述
 [J].制冷学报,2008,29(6):46-50. (LI Kuining, GUO Ningning, WANG He. Review of study on improving conductivity of phase change material [J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(6):46-50.)
- [12] 李炅,张秀平,贾磊,等. 开孔泡沫金属热传输性能研究 进展[J]. 制冷学报, 2013, 34(4):96-102. (LI Jiong, ZHANG Xiuping, JIA Lei, et al. Research progress of open cell metal foams thermal transport performance[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(4):96-102.)
- [13] 徐伟强,袁修干,邢玉明.填充泡沫镍对固液相变过程的 影响[J].北京航空航天大学学报,2009,35(10):1197-1200. (XU Weiqiang, YUAN Xiugan, XING Yuming. Effect of embedding nickel foam on solid-liquid phase change[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(10):1197-1200.)
- [14] Velraj R, Seeniraj R V, Hafner B, et al. Heat transfer enhancement in a latent heat storage system[J]. Solar Energy, 1999, 65(3):171-180.
- [15] 白天,余立琼,龚静,等.泡沫碳/相变材料复合体研究进展[J]. 宇航材料工艺,2011,41(5):6-9. (BAI Tian, YU Liqiong, GONG Jing, et al. Development of composites of carbon foam/phase change materials[J]. Aerospace Materials and Technology, 2011, 41(5):6-9.)
- [16] 余立琼,李凯,刘荣军,等.强度增强泡沫炭的制备、结构 与性能[J].高等学校化学学报,2011,32(4):834-838.
 (YU Liqiong, LI Kai, LIU Rongjun, et al. Preparation, structures and properties of strength-enhanced carbon foams
 [J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2011,32 (4):834-838.)

通信作者简介

盛强,男,博士/助理研究员,中国科学院空间应用工程与技术 中心,(010)82178223,E-mail: shengqiang_buaa@126.com。研 究方向:固液相变蓄热材料及其传热强化技术。

About the corresponding author

Sheng Qiang, male, Ph. D./assistant professor, Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, +86 10-82178223, E-mail: shengqiang_buaa@126. com. Research fields: solid/liquid phase change thermal storage materials and thermal conductivity enhancement.