

文章编号:1000-8055(2013)09-1927-06

八水氢氧化钡相变材料的强化传热实验

盛 强^{1,2}, 邢玉明¹, 王 泽¹

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191;

2. 黑龙江大学 建筑工程学院, 哈尔滨 150080)

摘 要: 采用差示扫描量热法(DSC)对八水氢氧化钡相变材料进行热物性分析,总结出一种针对结晶水合盐相变温度与潜热准确可靠的测量方法.通过扫描电子显微镜(SEM)获得相变材料与金属容器截面腐蚀情况的图像,证明八水氢氧化钡与紫铜有优良的相容性.分别对含/未含泡沫铜的固液相变蓄热体进行实验研究,结果表明:泡沫铜填充使相变材料在固相区内熔化时间减少了 26%,增强了相变材料的传热效果,而且将八水氢氧化钡过冷度降低了 50%.

关 键 词: 八水氢氧化钡; 示差扫描量热法; 扫描电子显微镜; 泡沫铜; 强化传热

中图分类号: V259; TK512⁺.4

文献标志码: A

Experiment on heat transfer enhancement of barium hydroxide octahydrate phase change material

SHENG Qiang^{1,2}, XING Yu-ming¹, WANG Ze¹

(1. School of Aeronautics Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. School of Civil Engineering,

Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: The thermal properties of barium hydroxide octahydrate ($\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) were measured by differential scanning calorimetry (DSC). The DSC measurement method can be used for phase change temperature and latent heat of salt hydrates. The cross section image from scanning electron microscope (SEM) indicates that $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ and copper present excellent compatibility. Experiments were conducted to investigate heat transfer characteristics of $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ with/without copper foams. The results show that melting time of the phase change material (PCM) is shortened by 26% in PCM solid zone and the heat transfer rate of the PCM is enhanced. The supercooling degree of $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ is reduced by 50%.

Key words: barium hydroxide octahydrate; DSC; SEM; copper foams; heat transfer enhancement

近年来蓄热储能技术被广泛应用在节能降耗和可再生能源利用方面.在众多储能的方法中,固

液相变材料(phase change materials, PCMs)的潜热储能方式由于其高潜热密度和较为恒定的相变

收稿日期:2012-11-19

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130926.1103.201309.1927_007.html

基金项目:国家自然科学基金(50876004);黑龙江大学青年科学基金(QL201042)

作者简介:盛强(1981—),男,吉林长春人,讲师,博士生,主要从事固液相变蓄热强化传热研究.

温度等特点被广泛应用于太阳能利用、电子设备热设计、建筑节能等领域^[1]. 固液相变材料通常分为有机类和无机类^[2]. 有机类 PCMs 常用的是石蜡, 有机类 PCMs 一般不易出现过冷和相分离现象, 材料的热化学性质稳定, 腐蚀性小, 毒性小和成本比较低廉, 但是有机类 PCMs 存在导热系数较小和易在高温条件下氧化燃烧等问题. 无机类 PCMs 最典型的是结晶水合盐, 它们都有较大的溶解热和固定的熔点. 当温度升高时, 结晶水合盐脱出结晶水使盐溶解吸热; 当温度降低时发生逆过程, 吸收结晶水放热. 结晶水合盐与有机类 PCMs 相比, 具有导热系数较大, 密度大且单位体积的蓄热密度高等优点. 但是结晶水存在过冷度大、相分离及腐蚀性等缺点, 为了减少其过冷度和抑制相分离, 在实际应用中需添加一定量的成核剂和增稠剂加以改善.

结晶水合盐作为一种典型的中低温相变储能材料, 凭借其较大的单位质量储能容量, 一直受到国内外研究者的广泛重视. 其中, 降低结晶水合盐的过冷度和改善其导热性能一直是相变储能技术研究中关注的焦点. 刘栋等^[3]采用步冷曲线法和 thermal gravimetric analysis-differential scanning calorimetry (TGA-DSC) 方法研究了室温冷却开放体系和冰水浴冷却封闭体系两种工况下 7 种不同成核剂和六水氯化钙复合体系的储能性能. 李金田等^[4]研究了结晶水合盐的过冷机理, 并通过过冷实验照片和步冷温度曲线发现使用质量分数为 5% 的十二水磷酸钠和质量分数为 3% 的增稠剂明胶做添加剂后, 三水醋酸钠的过冷性能得到明显改善. 沈卫东和曾丹苓^[5]实验研究了不同的添加剂对八水氢氧化钡成核性能的影响, 筛选出可以不断促进结晶水合盐生成小晶粒的成核剂. Lane^[6]从材料的晶体结构、溶解性和水合物稳定性等方面理论上阐述了添加结晶水合盐的同晶形混合物和同结构混合物的成核剂促进了结晶水合盐成核性能. Farid 等^[7]将十水碳酸钠和五水硫代硫酸钠分别添加到两个不同的相变潜热储能器进行相变储能效率研究, 发现这两种带有不同结晶温度相变材料的应用能够进一步提高其潜热储能系统的性能. Frusteri 等^[8]在六水硝酸镁、六水氯化镁和硝酸铵的低共熔混合物中随机添加不同量的碳纤维进行相变储能实验研究, 发现碳纤维有抗无机类 PCMs 化学腐蚀的能力, 并且可以强化该低共熔无机混合物的导热性能. Zhou 等^[9]将石蜡和六水氯化钙作为储能工质进行瞬态的热

性能研究, 发现在两种不同相变材料中添加金属泡沫后, 提高了它们在熔化过程中的导热性能.

对于应用于建筑节能和电子散热等领域中的中低温固液相变材料, 热化学稳定性、导热性能和腐蚀性是影响其相变储能技术广泛应用的主要因素. 在 0~120℃ 的低温相变温度区, 结晶水合盐的单位体积相变焓通常在 200~400 MJ/m³, 而八水氢氧化钡 ($\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) 是目前为止发现在此低温相变温度区单位体积相变焓最高 (572 MJ/m³) 的结晶水合盐^[10]. 本文分析了 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 相变材料的相变温度与潜热, 并根据 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 与紫铜的相容性研究, 制作了 2 套 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 相变储能装置的实验模型, 通过实验测试分析了泡沫铜对该结晶水合盐导热性能的强化作用.

1 实验研究

1.1 相变材料和泡沫金属

实验中所用 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 相变材料为国药集团药业股份有限公司化学试剂有限公司提供, 纯度等级为分析纯; 泡沫铜为吉林卓尔科技股份有限公司提供, 孔密度 (pores per inch, PPI) 为 10, 孔隙率为 97%.

1.2 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的热物性分析

差示扫描量热法 (DSC) 是以热量为测量物理量的热分析方法, 可用于测定相变材料的一些重要热物理性质, 如相变温度、相变热焓等, 具有速度快、试样用量少、准确度较高等优点, 是研究相变材料的有效手段^[11]. 实验所用仪器为德国耐驰仪器制造有限公司制造的差示扫描量热仪 (Netzsch STA 409PC), 采用升温速率为 3℃/min, 温升范围为 26~105℃ 的一组基线. 在 DSC 测试中, 通入高纯氮气为吹扫气, 避免 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 在加热过程中发生化学反应. 新坩埚所用材料的差别会在基线上产生假象, 用这种假象的基线处理后, 会使最终测量结果分析复杂化, 因此, 对坩埚进行了二次加热, 确保基线的准确性和可靠性.

1.3 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 对紫铜的腐蚀性分析

在 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 与紫铜相容性实验中, 称取 40 g 的样品晶体填装到外径为 20 mm 的紫铜试管中, 插入探针型 Pt100 热电阻温度传感器, 使热电阻头部测温区位于样品中心区域, 将紫铜试管放置在恒温水槽中, 保持水温在 50~95℃ 变化对 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 进行 50 次熔化-凝固热循

环实验,经过 50 次热循环实验后截取部分与样品充分接触的金属试管进行扫描电子显微镜 (SEM) 分析,并且按一定时间间隔记录样品的温度变化,绘制 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 在各次热循环过程中的步冷温度曲线。

1.4 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 强化传热实验测试

$\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 强化传热实验台示意图如图 1 所示。该实验台主要由 3 个部分组成:主测试台、能量控制系统和数据采集系统。主测试台包括电加热器,含/不含泡沫铜的相变蓄热体和贴片式热电阻温度传感器。采用数字显示精度为 $\pm 1\%$ 的直流稳压稳流电源控制电加热器的功率输入,为两组含/不含泡沫铜相变蓄热体实验件提供相同的加热能量。热电阻的温度变化情况通过数据采集模块 (ADAM-4015) 来记录,测温误差为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

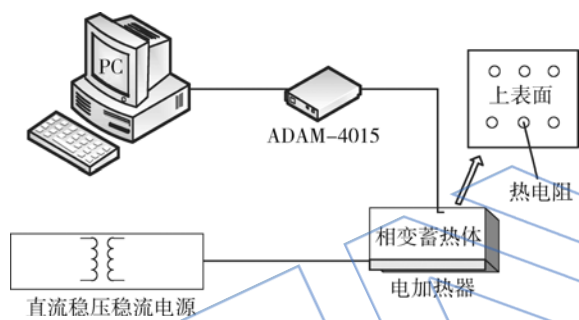


图 1 相变蓄热体传热实验台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of phase change thermal storage experimental set-up

实验中设计制造了 2 个几何结构相同的相变蓄热立方体 ($150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 20\text{mm}$) 内部储存 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 相变材料,这两组相变蓄热体的材料为紫铜,其中一组不添加泡沫铜,另一组添加泡沫铜。在设计加工中泡沫铜与相变蓄热槽之间采用过盈配合,降低泡沫铜与相变蓄热槽之间的间隙,避免空穴间隙在实验过程中对热量传递带来的不利影响。相变蓄热体制作完成后,其四周和上下表面没有采用绝热措施。与相变蓄热体横截面大小相等的薄膜电加热器紧密地贴附在紫铜蓄热体的下底面,尽可能地减少电加热器与相变蓄热体之间接触热阻。经过标定的 6 支热电阻温度传感器分别对应固定在两组相变蓄热体上表面的相同位置,目的是进行实验结果对比,温度由数据采集系统自动测量记录,绘出蓄、放热过程中温度随时间的变化曲线,数据采集的时间间隔为 2 s。

2 结果与讨论

2.1 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的 DSC 测试结果

2.1.1 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 晶体结构的确定

结晶水合盐是通过结晶水脱水-水合反应进行热量的储存-释放,结晶水的数目对结晶水合盐相变材料的蓄热密度和储能容量有很大影响,因此,确定结晶水合盐的结晶水数目是很必要的。 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 有强腐蚀性,采用密封性不好但抗腐蚀的铂铑坩埚进行测试样品的热物性,导致 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 在高纯氮气的环境下,由于水蒸气的分压力较小,样品所含结晶水会不断地蒸发,此时测得的 DSC 曲线描述的不完全是 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的熔解热,还包括部分结晶水的蒸发潜热。 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 在真空或干燥的空气中受热可脱去结晶水,脱水一般分为两个阶段:第 1 阶段在 $60 \sim 125^\circ\text{C}$ 失去 7 个分子水形成 $\beta\text{-Ba}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$;第 2 阶段在 $125 \sim 150^\circ\text{C}$ 脱去最后一个分子水形成 $\beta\text{-Ba}(\text{OH})_2$ [12]。

第 1 阶段水合氢氧化钡脱水过程为

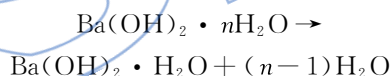


图 2 是采用铂铑坩埚的 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 进行同步的热重-差示扫描量热 (TG-DSC) 测试曲线。从图 2 中可以看出: TG 曲线与 DSC 曲线出现吸热峰的位置对应, TG 曲线上的热重质量分数 (39.8%) 与水合氢氧化钡在第 1 阶段分解水分子的理论热重质量分数相对应,由此,可以得到样品结晶水的个数为 7.94。

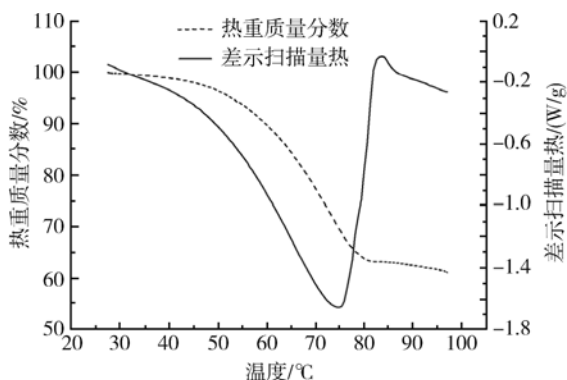


图 2 样品的 TG-DSC 测试曲线 (铂铑坩埚)

Fig. 2 TG-DSC test curves of sample (platinum rhodium crucible)

2.1.2 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的 DSC 测试分析

从图 2 中的 DSC 测试结果可以看出铂铑坩埚由于不能承受一定样品内部的蒸发压力,在 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 受热过程中,结晶水不断从铂铑坩埚的间隙处析出被吹扫气带走,导致放置于气密性差的铂铑坩埚中的 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 进行 TG-DSC 测试过程中发生严重的质量减少. 因此,为了较准确绘制出 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的 DSC 曲线,本实验采用了耐腐蚀且能够承受 10MPa 压力的镀金坩埚^[13],气密性好的高压镀金坩埚能够有效地抑制结晶水合盐受热析出的结晶水被吹扫气带走,减少样品的热重.

图 3 为采用高压镀金坩埚的 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的 TG-DSC 测试曲线. $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的起始熔化温度即固液相变温度为 78.5°C ,通过 DSC 曲线吸热峰的面积计算 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 熔化潜热为 284 J/g . 图 3 中所测相变温度与潜热数据与文献[2]提到 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的相关参数相符.

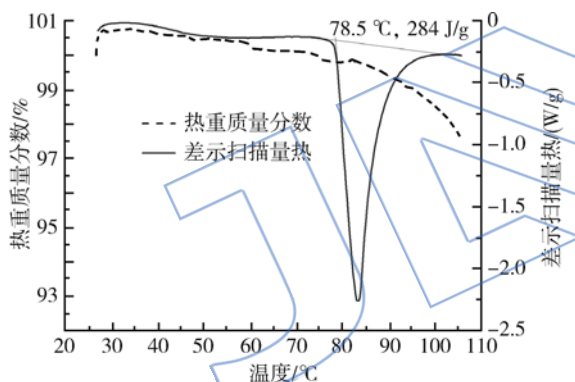


图 3 样品的 TG-DSC 测试曲线 (高压镀金铂锅)

Fig. 3 TG-DSC test curves of sample (high-pressure crucible with gold-plated surface)

2.2 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 金属腐蚀的 SEM 扫描结果

图 4 是 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 填充到紫铜试管进行了 50 次热循环实验后对金属试管截面的 SEM 扫描照片. 从紫铜试管截面的 $20\mu\text{m}$ 的 SEM 分析照片看出:经过多次的熔化-凝固热循环后金属表面只出现了一些细小的相变微裂纹,说明紫铜与 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 有很好的相容性,这与文献[14]中所述氢氧化钡与铜合金有优良的相容性,几乎在全部使用条件下抗蚀的说法是一致的.

2.3 泡沫铜对 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 传热的影响

图 5 是在相同加热功率下含/不含泡沫铜的两组相变蓄热体上表面的平均瞬时温度曲线,

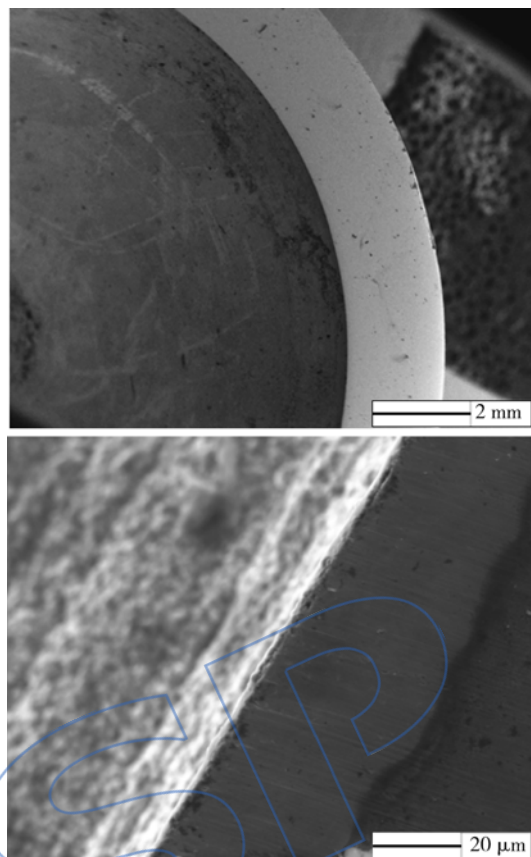


图 4 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 与紫铜相容性的 SEM 扫描照片

Fig. 4 SEM images of compatibility of $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ and copper

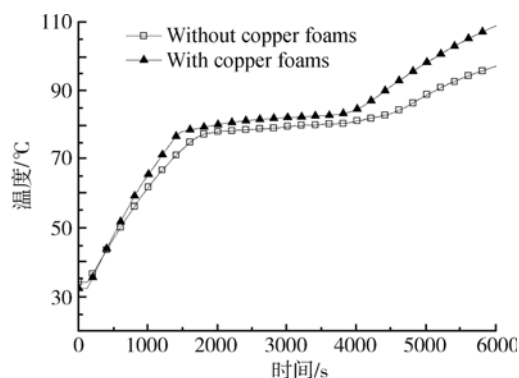


图 5 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 与泡沫铜复合相变材料的温度曲线

Fig. 5 Temperature curves of $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ and copper foams composite PCM

总加热功率为 80 W ,相同加热时间为 6000 s . 在热源加热的前期阶段(即相变材料的固相区),含泡沫铜相变蓄热体上表面的平均温度在 1480 s 到达了 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的相变点温度 78°C ;未含泡沫铜的相变蓄热体上表面的平均温度在 1998 s 到达了 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的相变点温度 78°C ,含

泡沫铜比未含泡沫铜的相变蓄热体在吸热时间上减少了 518 s, 泡沫铜复合相变材料比只有 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 相变材料在熔化时间上减少了 26%, 很显然泡沫铜复合相变材料的导热系数大于只有 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 相变材料的导热系数. 在热源加热的中期阶段(即相变材料的两相区), 含泡沫铜的相变蓄热体在固液两相区内温度从 1480 s 的 78.5°C 升高到 3680 s 的 82°C 时, 经过了 2200 s 的时间; 未含泡沫铜的相变蓄热体在固液两相区内温度从 1998 s 的 78°C 升高到 4218 s 的 82°C 时, 经过了 2220 s 的时间. 含泡沫铜的相变蓄热体表面瞬时平均温度的升温速率与未含泡沫铜的相变蓄热体表面瞬时平均温度的升温速率近似一致, 说明 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 在此阶段吸热的主要表现为相变潜热, 含泡沫铜和未含泡沫铜的相变蓄热体在相同加热条件下的蓄热吸热能力相近, 即 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的相变潜热没有受到泡沫铜的影响, 相变材料的溶解热是相变材料的固有属性, 与是否添加泡沫铜无关^[15]. 在热源加热的后期阶段(即相变材料的液相区), 其升温速率的趋势与热源加热前期阶段的升温速率趋势一致, 这主要是由于 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 在单相区时吸热的主要表现为显热, 泡沫铜的添加增强了相变材料整体的导热效果.

2.4 泡沫铜对 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 过冷的影响

大部分结晶水合盐都存在过冷现象, 通过对结晶水合盐过冷机理的分析, 过冷是溶液结晶的必要条件, 也是结晶的推动力^[16]. 但是过冷问题使结晶水合盐不能在需要的温度范围内释放储存潜热而失去了蓄热的价值, 限制了结晶水合盐的利用. 图 6 是 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 与泡沫铜复合相

变材料的步冷曲线. 在 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 与紫铜的相容性实验中, 通过对样品的 50 次熔化-凝固热循环实验发现 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 在循环冷却水冷却条件下有 8°C 左右的过冷度; 在泡沫铜复合相变材料的强化传热实验中进行自然冷却放热实验发现相变材料的过冷度降低到 4°C , 说明添加泡沫铜相变材料能够有效降低 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的过冷度, 通过泡沫铜的骨架结构为结晶水合盐提供了成核位置并提高了成核能力.

3 结 论

本文以典型结晶水合盐—— $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 为固液相变材料测试了该材料的相变温度与潜热参数, 分析了该材料与紫铜的相容性, 研究了填充多孔泡沫铜对 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的传热和过冷性能的影响, 结论如下:

1) 经过大量的 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的 DSC 测试, 通过采用耐腐蚀、气密性好的高压镀金坩埚, 选择合理的加热速率和测量基线, 获得了一种准确可靠的针对结晶水合盐相变温度与潜热的 DSC 测试方法.

2) 对 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 进行 50 次熔化-凝固热循环实验后的紫铜试管截面进行扫描电子显微镜分析, 发现 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 与紫铜有优良的相容性.

3) 在相同的热流密度下, 泡沫铜复合 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 相变材料和没有添加泡沫铜的纯相变材料相比, 泡沫铜的添加能够有效地提高相变材料的导热性能, 加快相变材料的熔化过程, 较大地缩短相变材料的熔化时间, 减小吸热周期.

4) 添加泡沫铜还提高了结晶水合盐的成核能力, 有效地降低结晶水合盐的过冷度, 在整个过冷实验中, $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 通过应用泡沫铜使其过冷度减少了一半.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Zalba B, Marín J M, Cabeza L F, et al. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(3): 251-283.
- [3] 刘栋, 徐云龙. 成核剂对 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 相变材料储热性能的影响[J]. 太阳能学报, 2007, 28(7): 732-738.

LIU Dong, XU Yunlong. Thermoproperties research on nucleators- $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ composites under distinctive sys-

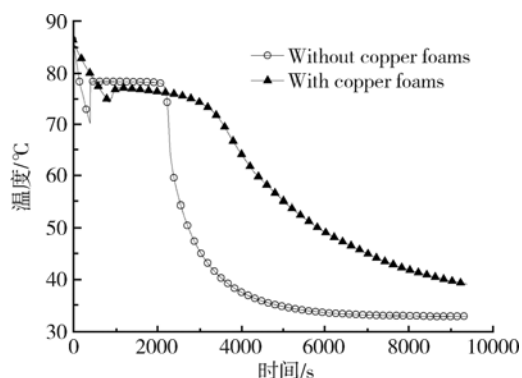


图6 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 与泡沫铜复合相变材料的步冷曲线

Fig. 6 Step cooling curves of $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ and copper foams composite PCM

- tems[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2007, 28(7): 732-738. (in Chinese)
- [4] 李金田, 茅靳丰, 李伟华, 等. 三水醋酸钠的过冷机理与实验研究[J]. *制冷学报*, 2009, 30(5): 32-35.
LI Jintian, MAO Jinfeng, LI Weihua, et al. Supercooling mechanism and experimental study of sodium acetate trihydrate[J]. *Journal of Refrigeration*, 2009, 30(5): 32-35. (in Chinese)
- [5] 沈卫东, 曾丹苓. 车用潜热贮热器相变贮热材料 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的成核[J]. *工程热物理学报*, 1996, 17(Sup. 1): 5-8.
SHEN Weidong, ZENG Danling. The nucleation of PCM $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ of latent heat accumulator for vehicles[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 1996, 17(Sup. 1): 5-8. (in Chinese)
- [6] Lane G A. Phase change materials for energy storage nucleation to prevent supercooling[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1992, 27(2): 135-160.
- [7] Farid M M, Khalaf A N. Performance of direct contact latent heat storage units with two hydrated salts[J]. *Solar Energy*, 1994, 52(2): 179-189.
- [8] Frusteri F, Leonardi V, Vasta S, et al. Thermal conductivity measurement of a PCM based storage system containing carbon fibers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25: 1623-1633.
- [9] Zhou D, Zhao C Y. Experimental investigations on heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous materials[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(5): 970-977.
- [10] Naumann R, Emons H H. Results of thermal analysis for investigation of salt hydrates as latent heat-storage materials[J]. *Journal of Thermal Analysis*, 1989, 35(3): 1009-1031.
- [11] Tyagi V V, Buddhi D. Thermal cycle testing of calcium chloride hexahydrate as a possible PCM for latent heat storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 92(8): 891-899.
- [12] 王青宁. 八水氢氧化钡制一水氢氧化钡的工艺研究[J]. *盐湖研究*, 1999, 7(2): 72-75.
WANG Qingning. The preparation of barium hydroxide monohydrate by dehydration of barium hydroxide octahydrate[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 1999, 7(2): 72-75. (in Chinese)
- [13] 李晶. 相变蓄热材料及其相变特性的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2005.
LI Jing. Study on phase change heat storage material and phase change properties[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [14] 美国金属学会. 金属手册: 第2卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [15] ZHANG Zhengguo, FANG Xiaoming. Study on paraffin expanded graphite composite phase change thermal energy storage material[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(3): 303-310.
- [16] 范颖, 万金庆, 成帅. 几种成核剂对硫酸钠溶液过冷度的影响[J]. *低温工程*, 2009(5): 60-64.
FAN Ying, WAN Jinqing, CHENG Shuai. Influence of some nucleating agent on sodium sulfate solution undercooling[J]. *Cryogenics*, 2009(5): 60-64. (in Chinese)