

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201902003



散热器供暖相变蓄热材料的性能实验

雷永康, 田琦, 武斌

(太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600)

摘要: 针对相变蓄热应用于散热器供暖存在的问题,开展以石蜡为相变蓄热基体,以膨胀石墨为强化传热载体的复合相变蓄热材料性能的实验研究.制备石蜡/膨胀石墨复合相变材料时,以相变温度 $64\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的石蜡为基体,加入膨胀石墨强化传热性能.实验研究表明:质量分数为 3.0% 的 50 目膨胀石墨蠕虫可以有效提高材料热导率;在相变蓄热水箱中,加入质量分数为 3.0% 的 50 目膨胀石墨蠕虫后,相变材料蓄放热时间缩短了 50% ;质量分数为 3.0% 的 50 目膨胀石墨试样的相变潜热值为 $203.1\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$.

关键词: 相变蓄热材料;散热器供暖;热性能;石蜡;膨胀石墨

中图分类号: TU 833 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)06-0748-08

Performance Test of Phase Change Thermal Storage Material in Radiator Heating

LEI Yongkang, TIAN Qi, WU Bin

(College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China)

Abstract: Aiming at the problem of phase change thermal storage applied to radiator heating, the experimental research on the performance of composite phase change thermal storage material with paraffin as phase change thermal storage matrix and expanded graphite as heat transfer carrier was studied. When preparing the paraffin/expanded graphite composite phase change material, paraffin having a phase transition temperature of $64\text{ }^{\circ}\text{C}$ was used as a matrix, and the expanded graphite was added to enhance the heat transfer performance. Experimental tests show that the addition of 50 mesh expanded graphite worms with a mass fraction of 3.0% can improve the thermal conductivity of the material effectively; and in the phase change hot water tank, the heat storage time of the phase change material shortens by 50% after adding these expanded graphite worms; the latent heat value of the 50 mesh expanded graphite sample with a mass content of 3.0% is $203.1\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$.

Keywords: phase change thermal storage material; radiator heating; thermal properties; paraffin; expanded graphite

随着社会经济的快速发展,能源需求持续增长,储热技术在工业和民用中得到广泛应用.热能的储存主要包括显热储热、潜热储热和热化学储热^[1].其中,潜热储热(相变蓄热)可对不连续、不稳定的热量进行充分利用,具有温度恒定、蓄热密度大等优点^[2-3].因此,相变蓄热技术在太阳能利用^[4]、电力的“移峰填谷”、废热和余热的回收利用,以及工业与民用建筑供暖等领域具有广阔的应用前景^[5-11].石蜡作为有机相变材料,其相变过程中的蓄热量较高,几乎没有过冷现象,熔化时蒸气压力低,不易发生化学反应,且化学稳定性较好,在多次吸、放热后,相变温度和相变潜热的变化很小.然而,石蜡的传热系数很

收稿日期: 2019-02-15

通信作者: 田琦(1966-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事暖通空调新技术、新能源利用的研究. E-mail: 412559908@qq.com.

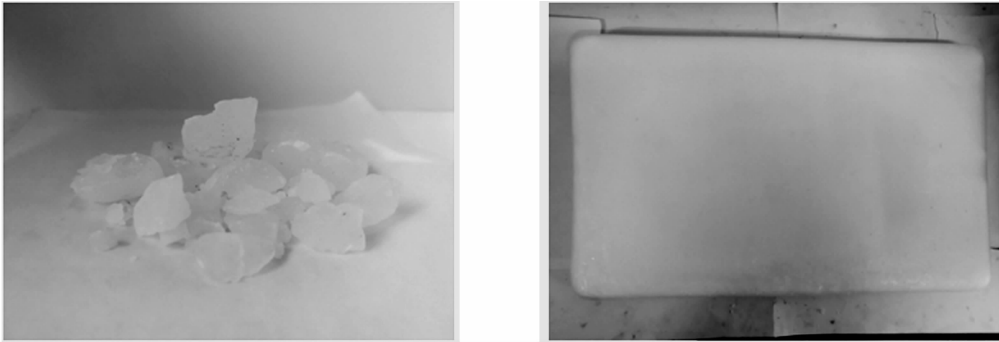
基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ04B02)

低,其实际应用受到一定的限制.为了提高相变过程中储存和释放热量的效率,膨胀石墨的加入可以有效改进石蜡的传热效率.膨胀石墨是由天然石墨鳞片经插层、水洗、干燥、高温膨化后,得到的一种疏松多孔的蠕虫状物质,采用膨胀石墨蠕虫作为石蜡载体,可提高石蜡的传热系数^[12-18].与水的显热蓄热技术相比,相变蓄热技术节省了蓄热材料所需的空間,且蓄热和放热温度更加集中.在现有文献中,石蜡/膨胀石墨复合材料的研究大多选用相变温度为 50 ℃ 以下的石蜡,而常规散热器供暖的平均温度约为 60 ℃,这些相变蓄热材料不适合直接用于散热器供暖.基于此,本文对散热器供暖相变蓄热材料的性能展开研究.

1 实验部分

1.1 实验材料

相变温度约为 64 ℃ 的 64 号半精炼石蜡样品,如图 1 所示.膨胀石墨样品,如图 2 所示.图 2 中:50 目膨胀石墨样品的膨胀倍率为 300 mL · g⁻¹,碳的质量分数为 99.5%; 80 目膨胀石墨样品的膨胀倍率



(a) 切碎后的石蜡样品 (b) 整块的石蜡样品

图 1 石蜡样品实物图

Fig. 1 Physical graph of paraffin sample



(a) 50 目 (b) 80 目 (c) 100 目



(d) D50 (e) 500 目

图 2 膨胀石墨样品实物图

Fig. 2 Physical graph of expanded graphitesamples

为 $250\sim300\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 碳的质量分数达到 99.0% 以上; 100 目膨胀石墨样品的膨胀倍率为 $250\sim300\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 碳的质量分数达到 99.0% 以上; D50 膨胀石墨样品的粒度为 $6.4\text{ }\mu\text{m}$, 由膨胀石墨蠕虫样品经电气流磨粉制备; 500 目膨胀石墨样品由膨胀石墨蠕虫样品磨粉制备。

1.2 石蜡/膨胀石墨复合材料的制备

将称量好的石蜡置于 100 mL 的烧杯中, 在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴锅中加热, 待石蜡完全融化后, 将膨胀石墨样品分批加入烧杯, 每次加入 $0.5\sim1.0\text{ g}$ 样品, 充分搅拌 0.5 h , 使膨胀石墨与石蜡充分吸附, 直至将膨胀石墨样品全部加入烧杯。然后, 充分搅拌 1.0 h , 使膨胀石墨与石蜡完全吸附。

1.3 蓄热性能测试系统

相变材料蓄热性能测试实验装置, 如图 3 所示。在盛有样品的烧杯内壁和烧杯中心位置, 竖直插入 2 根 Pt100 型温度传感器, 接通无纸记录仪, 设置记录温度的频率为每 5 s 一次。当温度稳定于室温时, 将烧杯置于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴锅中, 记录升温情况, 待温度恒定后, 将样品取出。该测试装置用于测试相变材料的传热能力, 往石蜡中加入不同类型的膨胀石墨和不同质量分数的膨胀石墨蠕虫, 并对复合材料样品相变过程所用时间及升温曲线进行测试, 选择传热能力较强, 相变过程更稳定的相变材料。

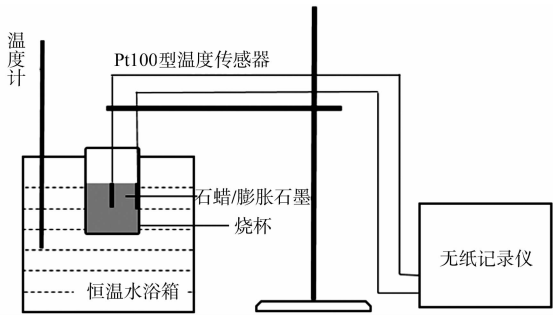


图 3 蓄热性能测试实验装置
Fig. 3 Experimental device of thermal storage performance test

1.4 热分析实验

在氮气气氛保护下, 设置升温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, 对石蜡及石蜡/膨胀石墨样品进行差式扫描量热法(DSC)测试。

1.5 相变蓄热水箱蓄放热实验

相变蓄热实验系统示意图, 如图 4 所示。蓄热时, 通过电热水器加热水, 待水温达到设定温度后, 打开电热水器出、入口阀门, 将热水通入相变蓄热水箱, 待水箱中测温点的温度恒定时, 蓄热过程结束。放热时, 关闭电热水器出、入口阀门, 打开自来水入水口阀门和排水口阀门, 将自来水通入相变蓄热水箱, 待水箱中测温点的温度恒定时, 放热过程结束。

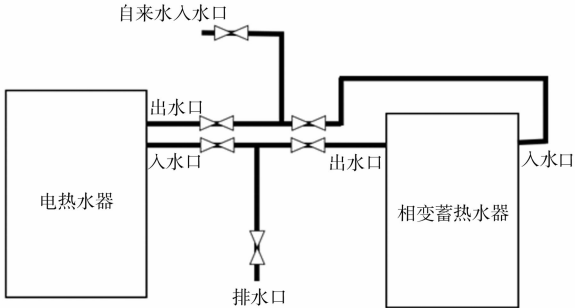


图 4 相变蓄热实验系统示意图
Fig. 4 Experimental system schematic of phase change thermal storage

通过该相变蓄热实验系统, 对相变蓄热水箱在蓄热和放热过程中内部温度的变化情况进行测试。同时, 测试膨胀石墨蠕虫加入前后, 水箱内温度的变化速率, 用于分析膨胀石墨的加入对相变蓄热水箱蓄热和放热过程的影响。

相变蓄热水箱实物图, 如图 5 所示。图 5 中: 水箱的长、宽、高均为 90 cm , 外部包裹 5 cm 厚的聚氨酯保温层; 水箱内部有 2 根主管连接 6 根副管, 在蓄放热过程中, 管内分别通入热水和冷水; 水箱内壁与管外壁之间为相变蓄热材料。

相变蓄热水箱内部测温点的分布图, 如图 6 所示。通过无纸记录仪及 Pt100 型高精度 A 级热电阻温度传感器记录温度。测温点分为 A, B, C 3 组, 分别测试水箱内部 3 个方向上的温度变化情况。

A 组测温点位于水箱中心位置的不同高度处, A1~A4 分别距离水箱底部 $75, 50, 25, 0\text{ cm}$, 用于表征蓄、放热过程中, 水箱不同高度处的温度变化情况。

B 组测温点位于高度 45 cm 处, 分布于入口方向第 3 根副管的空隙间, B1~B4 距离后壁面分别为 $5, 25, 55, 85\text{ cm}$, 用于表征蓄、放热过程中同一根副管附近不同位置处的温度变化情况。C 组测温点位于高度 45 cm , 距离后壁面 45 cm 处的不同副管附近, C1~C4 距离左壁面分别为 $10, 31, 59, 80\text{ cm}$, 用于表征蓄、放热过程中, 同一位置处不同副管的温度变化情况。

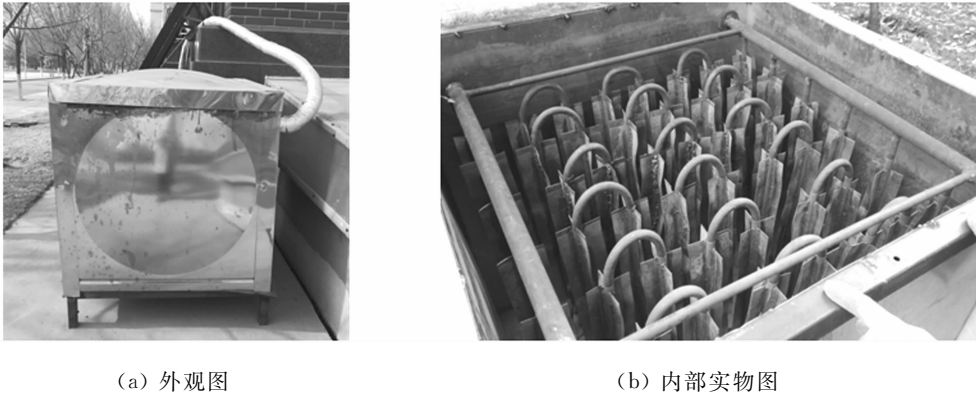


图 5 相变蓄热水箱实物图

Fig. 5 Physical graph of phase change hot water tank

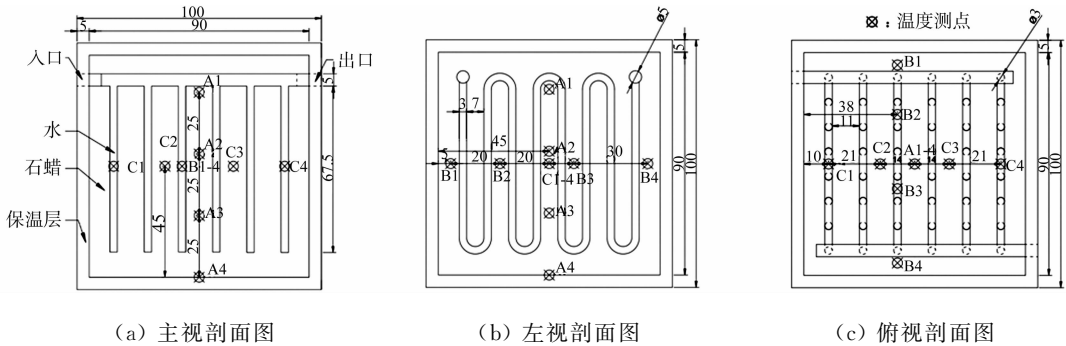


图 6 相变蓄热水箱测温点分布图(单位:cm)

Fig. 6 Temperature measurement point distribution graph of phase change hot water tank (unit: cm)

2 分析与讨论

在加热至透明液体状态的石蜡中,加入膨胀石墨蠕虫,膨胀石墨蠕虫将石蜡液体吸附到其内部的空心结构中,随着膨胀石墨蠕虫质量分数的增加,样品逐渐变浑浊,由于膨胀石墨蠕虫密度很低,单位质量体积非常大,因此,在制备质量分数为 5.0%的石蜡/膨胀石墨蠕虫复合材料时,可发现膨胀石墨蠕虫加入量达到饱和时,部分膨胀石墨蠕虫无法吸附石蜡液体,复合材料在烧杯中呈较为干燥的颗粒状。

2.1 不同类型膨胀石墨对石蜡蓄热性能的影响

控制各类型膨胀石墨的质量分数均为 2.0%,每个样品的总质量均为 50 g,将其置于同一种 100 mL 的烧杯中。样品配比方案,如表 1 所示。表 1 中: m 为质量。

表 1 样品配比表

Tab. 1 Ratio table of sample

| 参数 | 样品名称 | | | | | |
|--------------|------|------|------|-------|-----|-------|
| | 1-1 | 1-2 | 1-3 | 1-4 | 1-5 | 1-6 |
| m (石蜡)/g | 50 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 |
| 膨胀石墨型号 | — | 50 目 | 80 目 | 100 目 | D50 | 500 目 |
| m (膨胀石墨)/g | — | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

不同类型膨胀石墨样品的升温曲线,如图 7 所示。图 7 中: θ 为温度; t 为时间;复合相变蓄热材料样品中的膨胀石墨质量分数均为 2.0%;热水浴温度保持在 80 ℃。

由图 7 可知:加入膨胀石墨的样品升温速率比纯石蜡更快,膨胀石墨的加入提高了复合材料的传热能力。500 目、D50 膨胀石墨由 50 目膨胀石墨蠕虫磨粉制备而成,通过对比发现磨粉的膨胀石墨虽然提升了复合材料的升温速率,但由于蠕虫状结构被破坏,导致其对石蜡传热能力的提升明显小于 50,80,100 目膨胀石墨蠕虫样品。

由图 7 还可知:加入相同质量分数的膨胀石墨时,50 目膨胀石墨蠕虫对相变蓄热材料传热能力的

提高最为明显. 因此,在膨胀石墨蠕虫质量分数变化对样品传热能力影响的实验中,复合相变蓄热材料的制备选择 50 目膨胀石墨蠕虫.

2.2 不同质量分数膨胀石墨蠕虫对石蜡蓄热性能的影响

不同质量分数的 50 目膨胀石墨蠕虫的样品配比方案,如表 2 所示. 不同质量分数膨胀石墨样品的升温曲线图,如图 8 所示. 由图 8 可知:在复合相变蓄热材料中,随着 50 目膨胀石墨蠕虫质量分数的增加,样品在 80 ℃热水浴中的升温速率也明显提升. 故复合相变蓄热材料试样传热能力随膨胀石墨蠕虫质量分数的增加而提升.

表 2 不同质量分数膨胀石墨蠕虫的样品配比表

Tab. 2 Sample ratio table with different contents of expanded graphite worms

| 参数 | 样品名称 | | | | | |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 2-1 | 2-2 | 2-3 | 2-4 | 2-5 | 2-6 |
| $m(\text{石蜡})/\text{g}$ | 50.00 | 49.50 | 49.00 | 48.50 | 48.25 | 48.00 |
| $m(50\text{ 目膨胀石墨蠕虫})/\text{g}$ | — | 0.50 | 1.00 | 1.50 | 1.75 | 2.00 |

由图 8 还可知:质量分数分别为 3.0%,3.5%,4.0% 的 50 目膨胀石墨蠕虫的升温曲线较为平滑,升温过程也较为平稳;纯石蜡样品曲线及质量分数分别为 1.0%,2.0%,3.0% 的 50 目膨胀石墨蠕虫样品曲线的纵坐标方向间隔较大,即质量分数在 3.0% 以内,膨胀石墨蠕虫质量分数的增加对样品的升温速率提升非常明显;而质量分数为 3.0%,3.5%,4.0% 的样品曲线则非常接近,在这一范围内,膨胀石墨蠕虫质量分数的增加对样品升温速率提升并不明显,且在相变过程中没有特别明显的固-液共存状态,而当接近相变温度时,烧杯中的样品都处于熔融状态.

不同质量分数膨胀石墨的样品传热能力分析表,如表 3 所示. 表 3 中: w 为质量分数; θ_{\max} 为样品在热水浴锅中的最高温度; t_1 为样品升至最高温度所用的时间; δ_1 为样品升至最高温度所用时间与纯石蜡升至最高温度所用时间的比值; t_2 为样品升至 71 ℃所用的时间; δ_2 为样品升至 71 ℃所用时间与纯石蜡所用时间的比值.

由表 3 可知:当 50 目膨胀石墨蠕虫质量分数为 3.0% 时,该样品在 80 ℃恒温环境中的最高温度为

表 3 不同质量分数膨胀石墨的样品传热能力分析表

Tab. 3 Heat transfer capacity analysis table for samples with different expanded graphite contents

| 参数 | 样品名称 | | | | | |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 2-1 | 2-2 | 2-3 | 2-4 | 2-5 | 2-6 |
| $m(\text{石蜡})/\text{g}$ | 50.00 | 49.50 | 49.00 | 48.50 | 48.25 | 48.00 |
| $m(50\text{ 目膨胀石墨蠕虫})/\text{g}$ | — | 0.50 | 1.00 | 1.50 | 1.75 | 2.00 |
| $w(50\text{ 目膨胀石墨蠕虫})/\%$ | — | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 3.5 | 4.0 |
| $\theta_{\max}/\text{℃}$ | 71.2 | 71.8 | 71.6 | 73.2 | 72.6 | 72.2 |
| t_1/min | 64 | 59 | 57 | 47 | 36 | 36 |
| $\delta_1/\%$ | 100.0 | 92.2 | 89.1 | 73.4 | 56.1 | 56.1 |
| t_2/min | 63 | 53 | 53 | 32 | 31 | 31 |
| $\delta_2/\%$ | 100.0 | 84.1 | 84.1 | 50.8 | 49.2 | 49.2 |

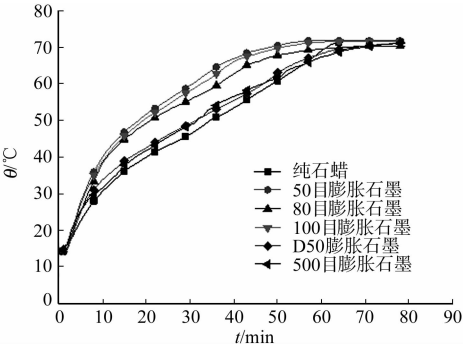


图 7 不同类型膨胀石墨样品的升温曲线图

Fig. 7 Temperature rise graph of different expanded graphite samples

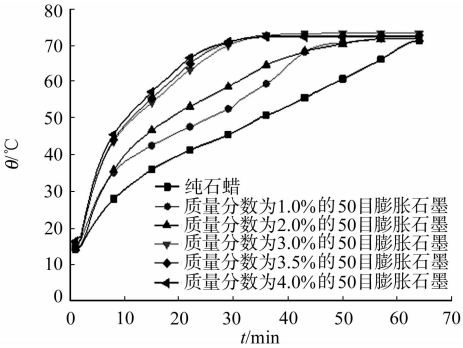


图 8 不同质量分数膨胀石墨的样品升温曲线图

Fig. 8 Temperature rise curve graph of samples with different expanded graphite contents

73.2℃, 为第 2 组样品的最高值, 且该样品升至最高温度所用时间为纯石蜡的 73.4%。以样品温度升至 71℃ 所用时间为衡量标准, 当 50 目膨胀石墨蠕虫质量分数为 3.0% 时, 该样品升至 71℃ 所用时间为纯石蜡所用时间的 50.8%, 且相较于样品 2-2、2-3, 其所用时间明显缩短。相较于样品 2-4、样品 2-5、2-6 所用时间并没有明显缩短。由此可知: 当 50 目膨胀石墨蠕虫的质量分数为 3.0% 时, 相对有效地提升了相变蓄热材料的传热能力, 是比较合适的配比方案。

2.3 相变蓄热材料的 DSC 测试

选取纯石蜡样品和加入质量分数为 3.0% 的 50 目膨胀石墨蠕虫的样品进行 DSC 测试, 样品的 DSC 曲线, 如图 9 所示。

由图 9 可知: 当温度为 60~70℃ 时, 样品的热流量 (ϕ) 较大, 故石蜡的固-液相变温度约为 60~70℃, 50 目膨胀石墨蠕虫的加入不会对材料的相变温度产生巨大的改变。对曲线数值进行积分, 可计算出纯石蜡在相变升温中的吸热量为 $245.5\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$, 质量分数为 3.0% 的 50 目膨胀石墨蠕虫样品的吸热量为 $203.1\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。由此可知, 随着 50 目膨胀石墨蠕虫的加入, 单位质量相变材料的蓄热量减少。

2.4 相变蓄热水箱内测温点的温度变化

将 580 g 石蜡加入相变蓄热水箱中, 测试相变蓄热材料为纯石蜡时, 相变蓄热水箱内温度的变化情况。将水加热至 75℃, 并通入相变蓄热水箱进行蓄热实验; 待水箱内各测温点及水箱出水口温度恒定后, 关闭电热水器进、出水口阀门, 打开自来水入水口阀门和排水口阀门; 通入冷水进行放热实验, 待水箱内各测温点及水箱出水口温度恒定, 相变蓄热材料为纯石蜡的蓄放热实验完成。在相变蓄热水箱内加入 18 g 50 目膨胀石墨蠕虫样品(质量分数为 3.0%), 再次进行水箱蓄放热实验, 测试各测温点温度的变化情况。测温点温度变化曲线, 如图 10 所示。

由图 10(a) 可知: 相变蓄热材料为纯石蜡时, 在蓄热过程中, A1~A4 曲线升温速率逐渐减慢, 水箱内部温度从上至下逐渐降低; 在放热过程中, A1~A4 曲线降温速率逐渐加快, 水箱内部温度从上至下逐渐降低; 相变材料加入膨胀石墨后, 亦可得出相同的结论。因此, 在蓄、放热过程中, 水箱内的上部温度高于下部温度。

在升温过程中, 当测温点温度接近石蜡相变温度时, 升温速率逐渐减缓, 在相变温度附近有一定的相变时间, 温度升高非常缓慢, 几乎接近于恒温; 相变完成后, 石蜡变为液

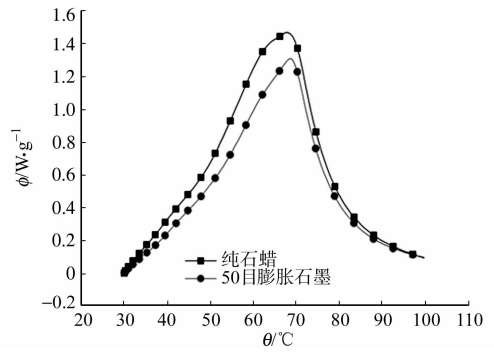
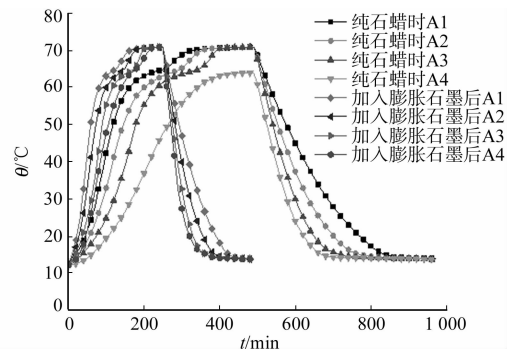
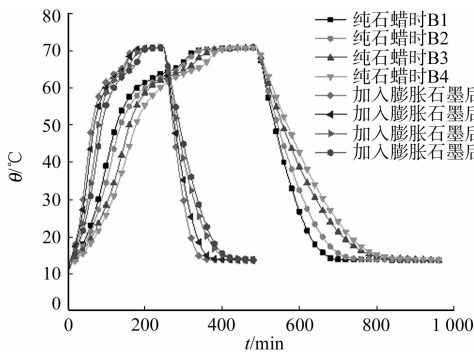


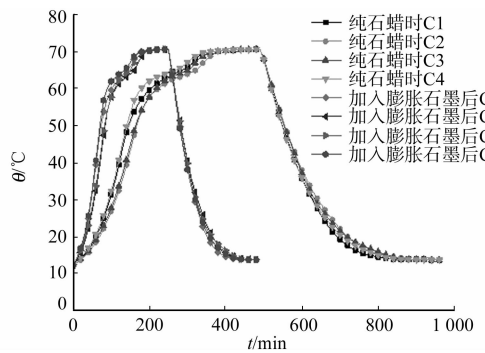
图 9 相变蓄热材料样品的 DSC 曲线
Fig. 9 DSC curve of phase change thermal storage material samples



(a) A 组



(b) B 组



(c) C 组

图 10 测温点温度变化曲线

Fig. 10 Temperature change curve of temperature measurement points

态,逐渐升温至最高温度.这是由于蓄热过程中,相变材料在相变时需要吸收大量的热量,所以在相变温度附近,升温速率非常缓慢;而在放热过程中,温度逐渐下降,降温速率随着温度的降低逐渐减缓,最终降至最低温度.这是由于相变温度与冷水温度温差较大,放热速率较快,所以降温速率没有明显的减缓趋势.

A4 测温点位于水箱最底部,对比加入膨胀石墨前后 A4 测温点的温度变化曲线可知:相变材料为纯石蜡时,在升温过程中,A4 最高温度只达到 63 ℃;加入膨胀石墨蠕虫后,A4 最高温度达到 70 ℃.由此可知:相变材料为纯石蜡时,在蓄热过程中,水箱中相变材料未全部融化;加入膨胀石墨蠕虫后,在蓄热过程中,A4 附近相变材料可以全部融化.

由图 10(b)可知:当相变材料为纯石蜡时,在蓄热过程中,B1~B4 升温速率逐渐减慢,即同一根副管附近的点,若距离副管入口处越近,其升温速率越快;在放热过程中,B1~B4 降温速率逐渐减慢,即在同一根副管附近的点,若距离副管入口处越近,其放热速率越快;加入膨胀石墨后,亦可得到相同的结论.因此,在蓄放热过程中,同一根副管附近的点,若距离副管入口处越近,升降温速率越快.

由图 10(c)可知:当相变材料为纯石蜡时,在蓄热过程中,C1~C4 升温速率非常接近;在蓄放热过程,C 组升、降温速率几乎相等.加入膨胀石墨后,亦可得到相同的结论.

加入膨胀石墨前后,由 A~C 测温点的温度变化曲线可知:当相变材料为纯石蜡时,蓄、放热所用时间远大于 50 目膨胀石墨蠕虫(质量分数为 3.0%)所用时间.通过计算,加入 50 目膨胀石墨蠕虫(质量分数为 3.0%)后,在蓄热过程中,各测温点升至最高温度所需时间是纯石蜡的 50.5%,而放热过程中,各测温点降至最低温度所需时间是纯石蜡的 50.7%.

因此,加入 50 目膨胀石墨蠕虫(质量分数为 3.0%)后,相变蓄热材料的蓄、放热速率提高了 50%左右,且使水箱内相变材料的相变更加完全.

3 结 论

1) 加入 50 目膨胀石墨蠕虫(质量分数为 3.0%)的相变材料样品具有较高的热导率.将该相变蓄热材料填充入相变蓄热水箱中,蓄、放热效率比纯石蜡提高了 50%.该试样在相变升温过程中的吸热量为 203.1 J·g⁻¹,相变温度约为 60~70 ℃,适合用于散热器供暖.

2) 由不同类型膨胀石墨与石蜡复合产生的相变材料的升温曲线可知,50 目膨胀石墨蠕虫的加入,对升温速率的提升最为明显,对相变材料热导率的提高最为有效.

3) 在复合材料中,当 50 目膨胀石墨蠕虫的质量分数为 3.0%时,相变复合材料的热导率提高较为明显,是纯石蜡热导率的 2 倍.

4) 膨胀石墨蠕虫的加入基本不影响相变材料的相变温度.膨胀石墨蠕虫的加入会导致相变材料的单位质量吸热量降低,50 目膨胀石墨(质量分数为 3.0%)的加入使单位质量吸热量降低约 17%.因此,膨胀石墨蠕虫的加入量不宜过大.

参考文献:

[1] ZHANG Huili,BAEYES J,CÁCERES G,*et al.* Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*,2016,53:1-40. DOI:10. 1016/j. pecs. 2015. 10. 003.

[2] 李贝,刘道平,杨亮. 复合相变蓄热材料研究进展[J]. *制冷学报*,2017,38(4):36-43. DOI:10. 3969/j. issn. 0253-4339. 2017. 04. 036.

[3] 赵杰,唐炳涛,张淑芬,等. 有机相变储能材料研究进展[J]. *中国科技论文*,2010,5(9):661-666. DOI:10. 3969/j. issn. 2095-2783. 2010. 09. 001.

[4] CHENG Fei,WEN Ruilong,HUANG Zhaohui,*et al.* Preparation and analysis of lightweight wall material with expanded graphite (EG)/paraffin composites for solar energy storage[J]. *Applied Thermal Engineering*,2017, 120: 107-114. DOI:10. 1016/j. applthermaleng. 2017. 03. 129.

[5] 张峰峰,田琦,李风雷,等. 蓄热型太阳能喷射制冷系统供冷性能分析及优化[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2017,38(4):525-530. DOI:10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201704015.

- [6] 穆林,雷勇刚,宋翀芳,等.相变蓄热材料导热系数对太阳能通风墙性能的影响[J].华侨大学学报(自然科学版),2017,38(6):830-835. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201612040.
- [7] CUNHA J P D,EAMES P. Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials: A review[J]. Applied Energy,2016,177:227-238. DOI:10.1016/j.apenergy.2016.05.097.
- [8] SHARMA A,TYAGI V V,CHEN C R,*et al.* Review on thermal energy storage with phase change materials and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2009,13(2):318-345. DOI:10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [9] GUO Xi,ZHANG Shaodi,CAO Jinzhen. An energy-efficient composite by using expanded graphite stabilized paraffin as phase change material[J]. Composites Part A Applied Science and Manufacturing,2018,107:83-93. DOI:10.1016/j.compositesa.2017.12.032.
- [10] 华维三,章学来,刘锋,等.新型无水箱相变蓄热式太阳能集热器及热性能研究[J].可再生能源,2017,35(3):395-400.
- [11] 闫泽滨,马素霞,李小刚.太阳能相变蓄热蒸发型空气源热泵复合供热系统的设计[J].可再生能源,2018,36(2):209-214.
- [12] XU Z,WAN S,DENG J,*et al.* Preparation and performance study on phase change material composite of paraffin/different particle sized expanded graphite[J]. New Chemical Materials,2017,45(5):57-59.
- [13] LACHHEB M,MUSTAPHA K,FETHI A,*et al.* Thermal properties measurement and heat storage analysis of paraffin/graphite composite phase change material[J]. Composites Part B,2014,66(4):518-525. DOI:10.1016/j.compositesb.2014.05.011.
- [14] HUA Jianshe,ZHANG Jiao,ZHANG Yan,*et al.* Study on thermal properties and shape-stabilizing of expanded graphite/paraffin composite phase change material[J]. Materials Review,2016,30(6):61-75.
- [15] 姜贵文,黄菊花.膨胀石墨/石蜡复合材料的制备及热管理性能[J].材料工程,2017,45(7):41-47. DOI:10.11868/j.issn.1001-4381.2016.000919.
- [16] 张钦真,郑秋云,赵增武,等.石蜡型复合相变材料蓄热性能实验研究[J].中国科技论文,2013,8(9):935-939. DOI:10.3969/j.issn.2095-2783.2013.09.023.
- [17] 张正国,王学泽,方晓明.石蜡/膨胀石墨复合相变材料的结构与热性能[J].华南理工大学学报(自然科学版),2006,34(3):1-5. DOI:10.3321/j.issn:1000-565X.2006.03.001.
- [18] 夏莉,张鹏,周圆,等.石蜡与石蜡/膨胀石墨复合材料充/放热性能研究[J].太阳能学报,2010,31(5):610-614.

(责任编辑:钱筠 英文审校:刘源岗)