

文章编号: 1007-6735(2017)02-0127-05

DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.2017.02.005

# 石蜡微乳液在板式换热器内的流动和传热特性研究

陆 威, 吴永卫

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 利用实验的方法研究了不同质量分数的石蜡微乳液在板式换热器中的压力损失和传热性能。结果显示, 质量分数接近 50% 的石蜡微乳液的储能能力强, 具有流动换热性能, 可以用于储能。含少量石蜡的微乳液的流动性好, 其换热能力在相变温度区间内显示出略好于水的传热特性。

**关键词:** 相变材料; 石蜡微乳液; 传热; 储能

**中图分类号:** TB 34 **文献标志码:** A

## Experimental Investigations on Flow and Heat Transfer Performances of Paraffin/Water Emulsions Flowing Through a Plate Heat Exchanger

LU Wei, WU Yongwei

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Paraffin/water emulsions with different mass fractions were experimentally investigated about their flow and heat transfer performances. Their pressure loss and heat transfer coefficient in heat exchangers were tested. The results show that the emulsions with higher paraffin concentration are good in energy storage with good heat transfer performance. The low concentration emulsion has good flow and heat transfer performances, and its heat transfer performance could be better than the water at phase change temperature.

**Keywords:** phase change materials; paraffin/water emulsion; heat transfer; energy storage

相变材料(PCM)越来越多地被用作储能材料, 以解决能量供应和需求之间的平衡问题, 用于节能建筑, 提高舒适度和能源效率。固液相变材料可以在很小的温度范围内吸收或释放大量的热能, 根据不

同的相变材料的相变温度, 可以将它们用于蓄冷或蓄热。然而, 固液相变材料的换热能力普遍不强, 尤其是当其处于固相的时候, 仅依靠导热过程换热, 吸、放热过程需要相当长的时间和很大的温差。因

收稿日期: 2016-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51406121); 上海市浦江人才计划(14PJ1407000); 上海市青年东方学者岗位计划(QD2015017)

第一作者: 陆 威(1977-), 女, 副教授。研究方向: 相变材料、强化换热。E-mail: wei.lu@usst.edu.cn

此,为了提高蓄能设备的快速响应能力,新型的蓄能设备需要通过强化换热来提高相变材料的换热能力,使其蓄能能力强,蓄能品质高,应用温度范围大,能够快速实时地响应用户需求. 为了提高相变材料的传热能力,研究人员应用具有高导热系数的材料如泡沫金属材料<sup>[1]</sup>、碳纤维<sup>[2]</sup>或石墨<sup>[3-4]</sup>来提高相变材料的表征导热系数. Agyenim 等<sup>[5]</sup>总结了常用的相变材料和强化传热方法. Martin 等<sup>[6]</sup>使相变材料和导热流体直接接触,为了实现较快的充、放热,他们的研究确定了流量、温差和石蜡的液滴大小等关键参数. 但是,水油间需要相分离,并且石蜡/水床层膨胀和被困的水降低了储存容器的储热能力.

近年来,许多研究人员不断地探索应用水等换热能力好的流体作为载体,带动准纳米级当量直径的相变材料进行换热<sup>[7-10]</sup>,如乳浊液、悬浊液或微胶囊悬浊液. 将不同相变温度区间的相变材料直接与水混合或将相变材料制成微胶囊的形式与水混合,这些方法使得相变材料无论是固相还是液相时都具有流动性,使其可以以对流换热的方式吸、放热,换热能力得到显著增强. 微胶囊相变材料的成本较高,在使用中容易结块和破损. 流化冰(冰/水混合物)的相变潜热大,但熔点固定在 0 °C,适用范围小. 盐的水合物便宜,但有腐蚀性,过冷度高,容易失效. 有机相变材料直接与水混合可以制成相变材料微乳液. Lu 等<sup>[10]</sup>对石蜡微乳液的热物理性质进行了实验测试,并对不同的表面活性剂、成核剂和其他添加剂对过冷度的影响进行了研究. Huang 等<sup>[8-9]</sup>的研究结果表明,质量分数为 30%~50% 的石蜡微乳液可以作为相变蓄冷材料.

本文将高质量分数(50%, 45%)和低质量分数(4%)的石蜡微乳液分别灌装到实验系统中,利用实验的方法研究了不同质量分数的石蜡微乳液在板式换热器中的流动和传热特性.

## 1 石蜡微乳液及其热物理特性

将石蜡(碳链的碳原子数决定相变温度)放入添加了表面活性剂的水中快速搅拌,使得石蜡以微纳米级颗粒/液滴的形式均匀分散于水中,制成石蜡微乳液. 制成的石蜡微乳液呈不透明的白色乳液状. 图 1 显示用蓝色纸为背景的石蜡微乳液流出实验管子的照片. 相变微乳液可以同时利用相变材料的潜热容量和水的显热容量,同时在相变过程中保持流动性,不需要额外的传热介质,传热性能良好.



图 1 石蜡微乳液

Fig.1 Paraffin/water emulsion

### 1.1 石蜡微乳液相变材料的热分析

图 2 是对质量分数为 48% 的石蜡微乳液进行热物理特性分析的 DSC(差示扫描量热仪)测试曲线,变温速率为 2 °C/min. 该微乳液含有质量分数为 40% 的 RT6(相变温度为 6 °C 的工业石蜡)和质量分数为 8% 的 RT25(相变温度为 25 °C 的石蜡,作为成核剂)及表面活性剂<sup>[10]</sup>. DSC 测试曲线显示,该相变材料的相变温度(熔化温度和凝固温度)由于添加了 RT25,比纯 RT6 的相变温度略有提高,凝固时的过冷度可忽略. 纯相变潜热约为 65 J/g,符合石蜡在复合材料中所占的比例,即石蜡微乳液的纯相变潜热与乳液中石蜡的质量分数基本线性相关<sup>[10]</sup>.

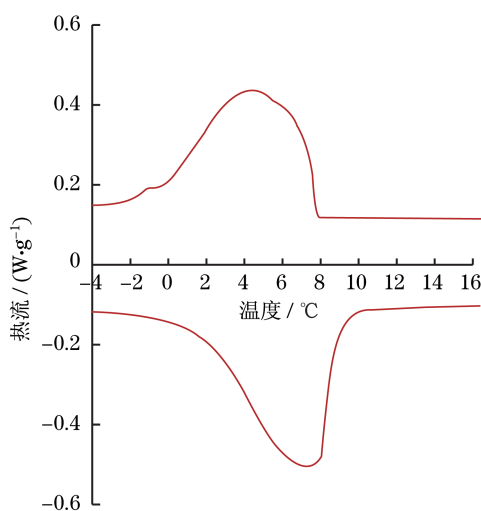


图 2 石蜡微乳液的 DSC 特性

Fig.2 DSC characteristics of paraffin/water emulsion

### 1.2 石蜡微乳液相变材料的黏度分析

图 3 显示了该石蜡微乳液的黏度测试曲线<sup>[10]</sup>,冷却速率为 3 °C/min,剪切速率为 150 s<sup>-1</sup>. 如图 3 所示,流体的黏度随温度的降低逐步升高. 在 20 °C 左右,由于部分 RT25 过冷凝固,引起黏度略有升高,再冷却到石蜡微乳液的相变温度时,流体黏度突

然显著升高,直至相变材料全部凝结,到冰点温度之

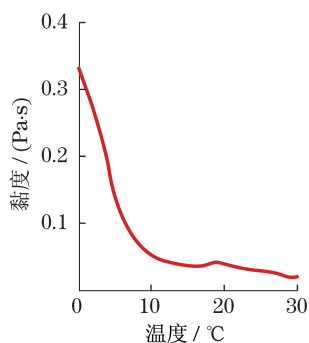


图3 石蜡微乳液的黏度特性

Fig.3 Viscosity property of paraffin/water emulsion

前,流体黏度依然随温降显著升高,但升高的斜率有所降低。

本文所采用的实验系统如图4所示,石蜡微乳液从相变材料箱被泵送到换热器1中,经含有抗冻剂的低温冷却水冷却(石蜡微乳液中的石蜡液滴凝固变成微颗粒)后再流经换热器2,被温水加热(石蜡微乳液中的石蜡颗粒熔化变成微液滴)后返回相变材料箱。返回相变材料箱的石蜡微乳液在箱体上部流出管道(如图1所示),对箱体内部的石蜡微乳液具有不断搅混的作用。石蜡微乳液的流量通过控制阀调节旁路的流量进行控制。实验所用的温度、压差和流量传感器的位置如图4所示。

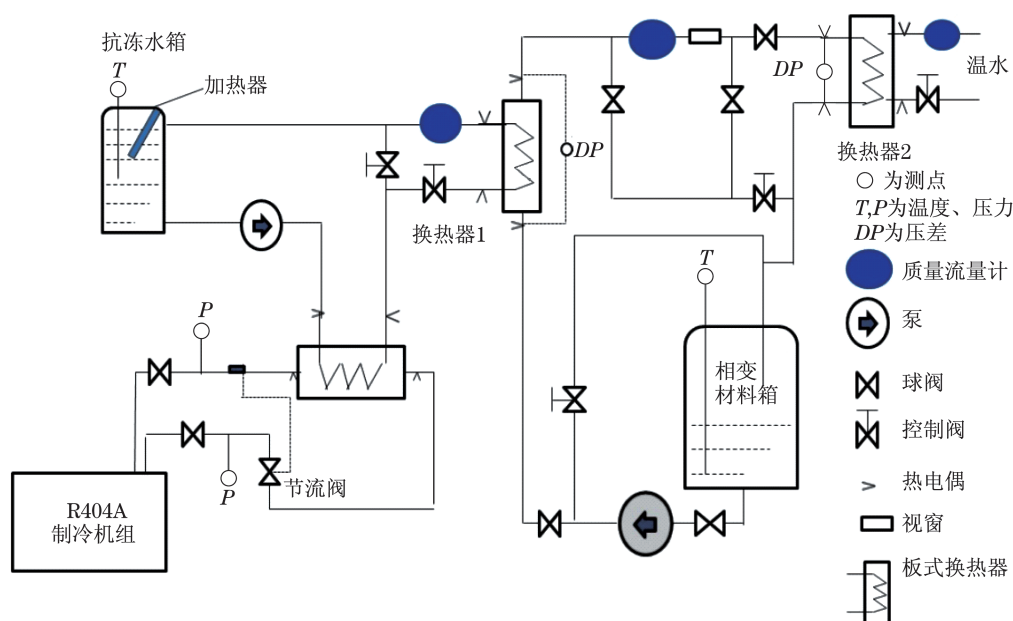


图4 实验装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of the experimental apparatus

## 2 实验结果分析

为了考察石蜡微乳液在实际系统中的流动与传热特性,以更好地应用这种新型材料,制备了两种质量分数的石蜡微乳液:50%的RT10/RT25(RT10和RT25的质量比为5:1)微乳液和4%的RT6/RT25(5:1)微乳液。分别将它们灌装入图4所示的实验系统中,测试高质量分数和低质量分数的相变材料微乳液在实际系统中的流动和传热特性,在测试完50%的RT10/RT25微乳液后加入一定量的水将其稀释到45%,再进行相同的测试。

### 2.1 流动特性分析

为了准确地测量工质在系统内的流动特性,避

免其他因素的干扰,首先将旁路关掉,放空换热器2内的温水,仅由换热器1对相变石蜡微乳液不断冷却。图5(见下页)表明了不同质量分数的石蜡微乳液在系统管道内的质量流量与石蜡微乳液温度之间的关系。由图5可以看出,高质量分数(50%,45%)的石蜡微乳液的质量流量在开始时随温度的降低而逐渐降低,在相变温度区间内(10~14℃)质量流量显著降低,石蜡微乳液中的相变材料完全凝固后,质量流量随温度降低而降低的速率有所减慢,但依然比纯液态时质量流量降低的速率快。这个现象与图3中黏度随温度的变化相似,只是两种材料的相变温度略有不同。高质量分数石蜡微乳液中相变材料的质量分数少量提高(从45%到50%),质量流量显著降低,意味着流体的黏滞阻力显著提高,质量分数

提高到50%时,黏滞阻力过高会形成断流.而低质量分数(4%)的石蜡微乳液的质量流量随温度的降低虽略有降低,但在相变温度区间内质量流量没有变化,说明在此低质量分数石蜡微乳液中相变材料相变对流体黏滞阻力的影响可忽略.

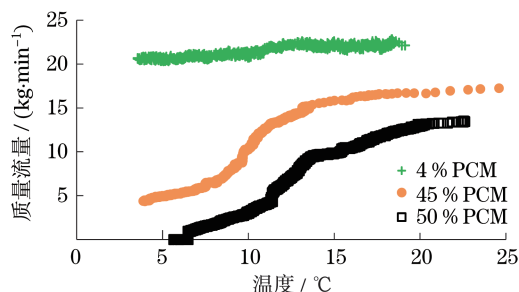


图5 系统内质量流量随温度的变化

Fig.5 Change of mass flow in the system with the temperature

## 2.2 相变时流经换热设备的压降

实验系统正常运行时,石蜡微乳液从相变材料箱被泵送到换热器1中冷却(凝固)后,再流经换热器2被温水加热(熔化)后返回相变材料箱.图6显示了不同工质流经换热器2时的压力损失.图6中的实线为制造商给定流体为水的曲线,实心的圆点和三角形分别代表以冷水和温水为工质的实测值,当质量流量小于15 kg/min时,实测值与制造曲线吻合得较好.低质量分数(4%)的石蜡微乳液在4~7 °C时流经换热器2产生的压降与10 °C冷水的实测压降相当.而高质量分数石蜡微乳液的压力损失显著高于水的,45%石蜡微乳液的压降是水的4倍,而50%石蜡微乳液的压降高达水的10倍.质量分数的提高意味着储能能力的提高,但在高质量分数时压力损失随质量分数的增加迅速飙升.

## 2.3 传热特性分析

由于实验条件的限制以及水与石蜡微乳液本身热物性参数的不同,在测试水的传热特性时,很难将系统调整到可与石蜡微乳液的实验数据直接比较的工况.为了更好地比较不同流动条件下各质量分数石蜡微乳液和水的传热特性,借鉴污垢系数<sup>[11]</sup>的计算方法,将水或石蜡微乳液的传热系数的实测值同相同温度和流量下净水的换热系数的标准计算值进行比较,定义了热阻系数 $H$ .

$$H = \frac{1}{h} - \frac{1}{h_s}$$

式中: $h$ 为实测的水或石蜡微乳液的换热系数; $h_s$

为制造商给定的净水的换热系数的标准计算值.

$H$ 的单位为( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )/W, $H$ 数值越大,等同于热阻越大.工程上可以应用 $H$ 估算实际需要的换热面积,简化实际计算.

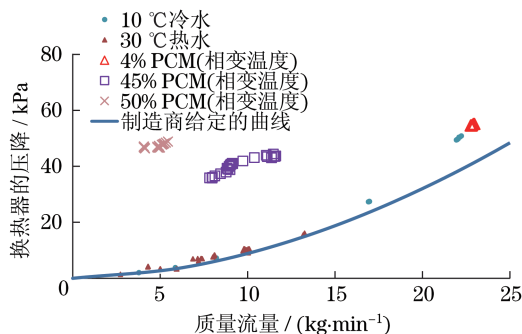


图6 不同工质在换热器2内压降与质量流量变化的关系

Fig.6 Relationship between the pressure drop and mass flow rate of different working fluids in the heat exchanger 2

各质量分数石蜡微乳液在相变温度附近5 °C的区间内强制对流的 $H$ 和相应温度下水的 $H$ 如图7所示.从图7中可以看出,4%石蜡微乳液的 $H$ 最小(接近0),自来水的次之(约0.000 04),高质量分数的石蜡微乳液的 $H$ 为0.000 1~0.000 3,与自来水或池水的污垢系数相当<sup>[11]</sup>.说明低质量分数(4%)的石蜡微乳液的热阻略小于水,其传热能力略高于水.但蓄能能力强的高质量分数(45%,50%)的石蜡微乳液的热阻高于水的,其传热能力比水弱,质量分数越高(如50%),石蜡微乳液的传热能力越弱,但仍与长时间运行的自来水的换热能力相当,具有较好的传热能力.

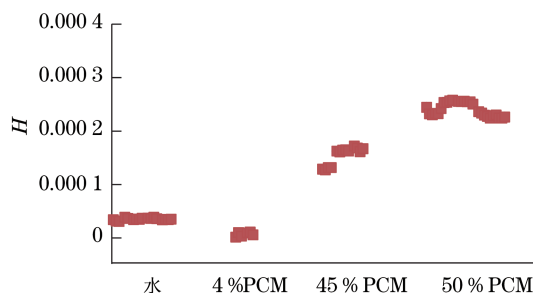


图7 不同工质的 $H$

Fig.7  $H$  coefficient of different working fluids

## 3 结 论

对不同质量分数的石蜡微乳液的流动和换热性



能进行了实验研究.实验结果表明,高质量分数的石蜡微乳液具有良好的储能能力和传热性能,但其凝固后的流动性较差,流动阻力很大,并且随着温度的降低而增加.低质量分数的石蜡微乳液虽然储能能力较弱,但具有良好的流动和传热性能,在相变温度区间内显示出略好于水的传热特性.

#### 参考文献:

- [1] ZHAO CY, LU W, TIAN Y. Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs)[J]. *Solar Energy*, 2010, 84(8): 1402 - 1412.
- [2] NAKASO K, TESHIMA H, YOSHIMURA A, et al. Extension of heat transfer area using carbon fiber cloths in latent heat thermal energy storage tanks[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2008, 47(5): 879 - 885.
- [3] MILLS A, FARID M, SELMAN J R, et al. Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(14/15): 1652 - 1661.
- [4] 姜传飞, 蒋小曙, 李书进, 等. 石蜡相变复合材料的研究[J]. *化学工程与装备*, 2010(8): 13 - 15.
- [5] AGYENIM F, HEWITT N, EAMES P, et al. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS) [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(2): 615 - 628.
- [6] MARTIN I, HE B, SETTERWALL F. Direct contact PCM-water cold storage[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(8): 2652 - 2659.
- [7] ZENG R L, WANG X, CHEN B J, et al. Heat transfer characteristics of microencapsulated phase change material slurry in laminar flow under constant heat flux[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(12): 2661 - 2670.
- [8] HUANG L, PETERMANN M, DOETSCH C. Evaluation of paraffin/water emulsion as a phase change slurry for cooling applications [J]. *Energy*, 2009, 34(9): 1145 - 1155.
- [9] HUANG L, NOERES P, PETERMANN M, et al. Experimental study on heat capacity of paraffin/water phase change emulsion [J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51(6): 1264 - 1269.
- [10] LU W, TASSOU S A. Experimental study of the thermal characteristics of phase change slurries for active cooling [J]. *Applied Energy*, 2012, 91(1): 366 - 374.
- [11] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 1998.

(编辑: 石 瑛)