

文章编号:1671-6833(2012)03-0087-04

## 铝泡沫和石墨泡沫强化石蜡相变传热的数值模拟

郭茶秀, 刘树兰

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 针对有机相变材料石蜡导热系数低的问题, 通过添加多孔介质的方法以强化石蜡相变传热, 并运用 CFD 软件对石蜡相变传热系统进行二维数值模拟。模拟结果表明: 铝泡沫和石墨泡沫都能有效提高相变材料传热速率, 铝泡沫的强化传热效果明显高于石墨泡沫的传热效果。随着孔隙率减小, 多孔介质/石蜡复合材料的有效导热系数增大, 传热速率加快, 凝固需要的时间缩短。并且, 孔隙率越小, 经过相同凝固时间, 装置内对应点温度越低。

**关键词:** 铝泡沫; 石墨泡沫; 相变; 数值模拟

**中图分类号:** TB66; TB69 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.03.022

### 0 引言

蓄热技术在许多工业、暖通和电子设备领域广泛应用, 近年来利用相变材料存储能量成为研究的热点。利用有机相变材料存储能量存在缺陷, 一些有机相变材料导热系数低, 不利于相变传热的进行。在相变装置中添加高导热物质可以改善有机相变材料导热系数低的问题。郭茶秀等<sup>[1]</sup>利用翅片对相变装置进行传热强化, 模拟中采用焓-多孔度法和 VOF 模型, 研究有翅片和无翅片的情况下的凝固过程、自然对流对融化过程的影响以及初始温差对凝固过程的影响。崔海亭等<sup>[2]</sup>以泡沫金属为基体, 在孔隙中填充相变材料, 利用 Fluent 的凝固/融化模型, 选择 2D 分离式、非稳态求解器对填充和没填充泡沫金属的相变材料制成的蓄热球的相变过程进行模拟。张涛等<sup>[3]</sup>在泡沫铜孔隙中填充纯度为 98% 的正 21 烷作为相变材料, 实验法研究了不同加热功率下的温度时间曲线。C. Y. Zhao 等<sup>[4]</sup>通过实验方法, 分别研究泡沫金属复合相变材料和膨胀石墨复合相变材料的热传导性。Mesalhy 等<sup>[5]</sup>采用石墨泡沫吸附石蜡制备出了石蜡/石墨泡沫复合相变储热材料, 研究了石墨泡沫的孔结构和导热系数对复合相变储热材料性能的影响。有机相变材料石蜡熔点低, 在低温相变范围有广泛的应用。所以, 有必要选择一种高

效的多孔介质骨架提高复合相变材料的有效导热系数。目前, 铝泡沫和石墨泡沫受到广泛关注。为了比较铝泡沫和石墨泡沫的综合传热效果, 选择一种较优的多孔介质骨架强化相变传热, 笔者运用 Fluent6.3 对用铝泡沫和石墨泡沫强化相变材料传热进行数值模拟。

### 1 物理模型

图 1 为多孔介质(铝泡沫或石墨泡沫)内石蜡相变传热装置示意图, 为了研究多孔介质对石蜡强化相变传热效果以及装置内部温度分布的均匀性, 取图 1 中的 5 个点进行监控。5 个点分别为点 1(16.5, 16.5), 点 2(16.5, 11.5), 点 3(16.5, 6.5), 点 4(16.5, 21.5), 点 5(16.5, 26.5)。该装置长宽均为 33 mm, 孔隙中充满石蜡, 石蜡和多孔介质的初始温度均为 303 K, 笔者研究蓄热过程中石蜡的相变传热情况。底部为恒温边界, 温度为 325 K, 装置中左右和顶部边界绝热。

笔者使用 Fluent6.3 商业软件, 采用非稳态、分离方式进行计算, 压力-速度耦合方式采用 PI-SO 算法, 压力离散方式为 PRESTO 格式, 其它设置采用二阶迎风差分格式。多孔介质材料的物性参数如表 1 所示。针对物理模型做如下假设:

(1) 初始时刻多孔介质骨架和石蜡温度均匀一致。

收稿日期: 2011-12-19; 修订日期: 2012-02-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176173)

作者简介: 郭茶秀(1975-), 女, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事太阳能研究与利用, E-mail: guochaxiu@sina.com.

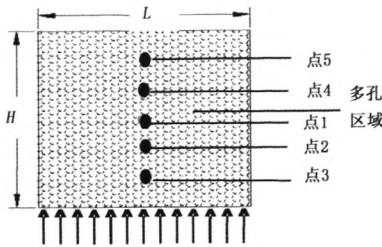


图 1 相变传热装置示意图

Fig.1 Diagram of heat transfer device of phase change

表 1 多孔介质材料和相变材料的物性参数

Tab. 1 Property parameters of materials

材料	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	比定压热容 $cp/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	导热系数 $k/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	相变热 $L/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	相变温度 $T_m/\text{K}$
石蜡	747	2 890	0.21(固态), 0.12(液态)	173 400	319 ~ 321
铝	2 719	871	202.4	—	—
石墨泡沫	2 260	710	129	—	—

$$k_{\text{eff}} = k_m - (k_m - k_i) \cdot \varepsilon. \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon$  为多孔介质的孔隙率;  $k_{\text{eff}}$  为有效导热系数,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $k_m$  为多孔介质导热系数,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $k_i$  为石蜡的导热系数,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ . 根据 Fluent 的凝固/融化模型的基本理论, 采用以上假设后, 数学模型可简化为

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0; \quad (2)$$

动量方程:

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{\rho}{\varepsilon^2} \left[ \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\varepsilon} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right); \quad (3)$$

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial v}{\partial \tau} + \frac{\rho}{\varepsilon^2} \left[ \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\varepsilon} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right); \quad (4)$$

能量方程:

$$\varepsilon \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \varepsilon \frac{k}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right); \quad (5)$$

$$k = \begin{cases} k_s, T \leq T_m - \Delta T \\ k_s + (T - T_m + \Delta T) \cdot \frac{k_l - k_s}{2\Delta T} \\ T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T \\ k_l, T \geq T_m + \Delta T \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $c$  为石蜡的比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $k_s, k_l$  为固液态石蜡的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $T_m$  为石蜡相变的平均温度,  $\text{K}$ ;  $\mu$  为液态石蜡的动力黏度,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ;  $H_m$  为石蜡的相变焓,  $\text{J}$ .

(2) 石蜡相变温度范围为 319 ~ 321 K, 物性参数不随温度变化, 液态石蜡为不可压缩流体.

(3) 多孔介质的各物性参数为各向同性.

(4) 加入多孔介质后, 忽略其它物性参数变化.

## 2 数学模型

相变装置中加入多孔介质后, 采用有效导热系数进行传热计算, 有效导热系数公式<sup>[6]</sup>为:

## 3 模型验证与网格独立性考核

### 3.1 模型验证

为了验证凝固/融化及多孔介质模型的正确性, 对文献[7]的融化过程进行二维数值模拟, 计算模型如图 2 所示. 石蜡填充到孔隙率为 90% 的泡沫铝中, 模型长  $L$  为 0.2 m, 高  $H$  为 0.05 m, 三面保温, 顶部有热流密度为  $1\,000\text{ W}/\text{m}^2$  的恒热流. 数值模拟时监控液相分数随时间的变化情况, 并与文献值进行比较. 从图 3 可见, 模拟值与文献值变化趋势相同, 数值接近, 误差为 16.7%. 所以, 笔者采用凝固/融化模型及多孔介质模型进行模拟的方法正确, 数据可靠.

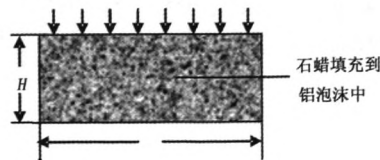


图 2 计算模型

Fig.2 Computation model

### 3.2 网格划分与独立性验证

为了得到可信的模拟结果, 需要验证网格的划分对模拟结果的影响. 这里选择 4 种网格划分方式, 网格数分别为 48 400, 27 225, 12 100, 6 889. 对 4 种网格划分条件下, 液相分数随时间的变化情况进行模拟, 结果如图 4 所示.

从图 4 看出, 网格数为 48 400, 27 225 时, 误差较大. 而网格数为 12 100, 6 889 时, 数值比较接

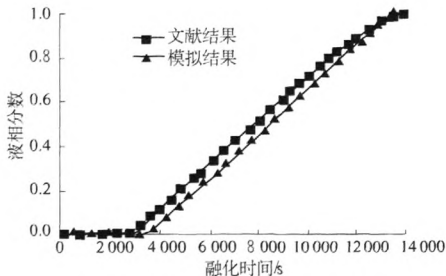


图3 模拟结果与文献结果比较

Fig. 3 Comparison of the simulation results with literature results

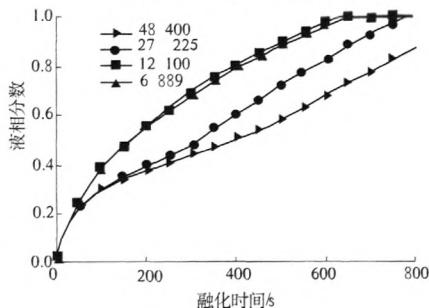
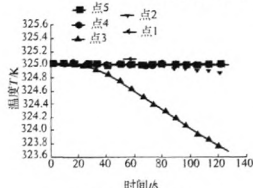


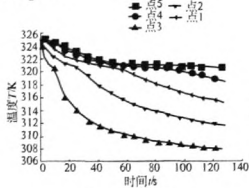
图4 4种网格划分下液相分数随时间的变化

Fig. 4 Liquid fraction changes with time

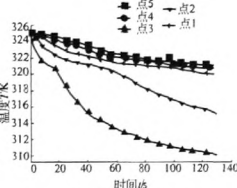
under various grid



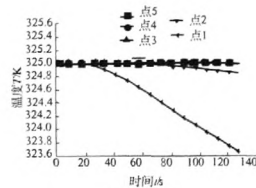
(a) 孔隙率=0.84



(b) 孔隙率=0.9



(c) 孔隙率=0.95



(d) 纯石蜡

图5 不同孔隙率条件下,各点温度随时间的变化

Fig. 5 Temperature changes over time at various points with porosity

(2) 图5(b)经过128 s时,点3的温度为308 K,比孔隙率为0.84时高1.5 K,而且,点4、5处温度变化缓慢,热量不能尽快导出,温度分布不均匀。

(3) 图5(c)经过128 s时,点3的温度为310 K,比孔隙率0.84时高3.5 K,点1、点4、点5的温度变化不大。

(4) 图5(d)经过128 s时,点3温度为323.7 K,比孔隙率0.84时高17.2 K,点2温度变化缓慢,点1、点4、点5温度基本不变。

所以,孔隙率越小,传热速率越快,凝固需要的时间越短,经过相同时间,装置内对应点温度越低。

#### 4.2 铝泡沫与石墨泡沫强化传热比较

用 Fluent 软件 Solidification and Melting 模

近,在537.7 s时,液相分数最大相差0.016 72,误差为1.8% < 2%。所以网格数为12 100,6 889两种网格划分对模拟结果的精度的影响已经合格。同时,为了节省系统资源,接下来的计算中,采用网格数为6 889的划分方式。

#### 4 模拟结果及讨论

##### 4.1 铝泡沫复合相变材料的凝固过程中温度分析

为了进一步了解多孔介质对相变传热的影响,模拟铝泡沫孔隙率为0.84,0.9,0.95和纯石蜡条件下,凝固过程装置内5个点的温度随时间的变化情况,凝固过程中,左右及顶部为绝热边界,初始温度为325 K,底部为恒温边界,温度为303 K,其它条件均相同。

图5为经过128 s时,不同孔隙率条件下相变装置内5个点的温度变化情况。

(1) 图5(a)经过128 s时,点3的温度达到306.5 K,温度最低,这是因为点3离恒温边界最近,温度最先降低。而且这时5个点的温度分布也比较均匀。说明在孔隙率为0.84时,相变装置内热量能很快传出去。

型,模拟铝泡沫和石墨泡沫对石蜡融化过程的影响,并对两者进行比较。比较结果如图6所示。

(1) 由图6(a)可知:孔隙率越大,完全融化需要的时间越长。而且,孔隙率相同时,铝泡沫强化相变传热需要的时间比石墨泡沫强化相变传热需要的时间少。所以,铝泡沫的强化传热速率快。

(2) 图6(b)表明:有效导热系数随孔隙率的增大而减小。填充铝泡沫时有效导热系数比填充石墨泡沫的有效导热系数大。孔隙率相同时,铝泡沫/石蜡复合材料的导热系数与石墨泡沫/石蜡复合材料导热系数最大相差11.74 W/(m·K)。

(3) 图6(c)显示:随着孔隙率增大,多孔介质骨架传递的热量减小,热量不能及时由固体骨架传递给石蜡,热通量越小,传热速率越慢。同一孔隙率下,由于铝泡沫的有效导热系数大,所以用

铝泡沫强化传热时热通量大于用石墨泡沫强化传热的热通量。孔隙率为0.92时,铝泡沫和石墨泡沫两种填充情况下,热通量最小相差 $3\text{ W/m}^2$ 。

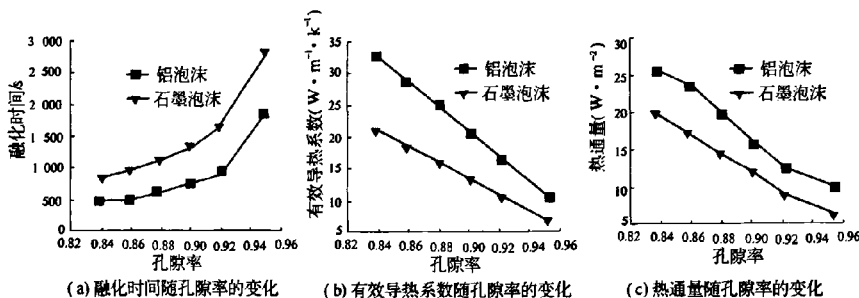


图6 各参数随孔隙率的变化

Fig. 6 Every parameters changes with porosity

## 5 结论

(1)凝固过程,孔隙率越小,经过相同时间后,各点的温度越低,传热速率越快,温度分布越均匀。

(2)在两种填充情况下,相变装置内石蜡的融化时间随孔隙率的增大而增大,有效导热系数随孔隙率增大而减小;热通量随孔隙率增大而减小。所以,铝泡沫和石墨泡沫都能强化石蜡相变传热。但是,铝泡沫对石蜡的强化传热效果明显优于本文物性条件下石墨泡沫的强化传热效果。

## 参考文献:

- [1] 郭茶秀,黄云浩,崔丽. 电子元器件相变冷却的数值传热研究[J]. 电子器件,2008,31(5):1553-1558.
- [2] 崔海亭,曹向茹,彭培英. 泡沫金属相变材料熔化传

热过程的数值分析[J]. 功能材料,2010,8(41):1439-1442.

- [3] 张涛,余建祖. 泡沫铜作为填充材料的相变储热实验[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(9):1021-1024.
- [4] ZHAO Chang-ying, WU Zhi-guo. Heat transfer enhancement of high temperature thermal energy storage using metal foams and expanded graphite [J]. Solar Energy Materials&Solar Cells,2010,95(2):1-8.
- [5] MESALHY O, AFDI K, ELGAFY A. Graphite foam matrices saturated with PCM for thermal protection purpose[J]. Graphite,2006,44(10):2080-2088.
- [6] 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,2007,6(28):14.
- [7] 崔海亭,刘凤青. 高孔隙率泡沫金属对相变蓄热的强化研究[J]. 河北科技大学学报,2010,31(2):93-96.

## Numerical Simulation of Heat Transfer Enhancement of Paraffin Wax Phase Change with Metal Foam and Graphite Foam

GUO Cha-xiu, LIU Shu-lan

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low conductivity of organic phase change material, two-dimensional numerical simulation on heat transfer enhancement of phase change of paraffin wax by adding porous media was conducted with the CFD software. The results showed that both Al foam and graphite foam could improve heat transfer rate effectively, and the effect of heat transfer of Al foam is superior to that of graphite foam, and the effective thermal conductivity of porosity/ paraffin wax composite materials is greater, heat transfer rate is faster; the solidification time shorten. And the temperature of corresponding points in device is lower after the same solidification time with the decrease of porosity.

**Key words:** Al foam; graphite foam; phase change; numerical simulation