

带环状翅片管式相变储热器的数值模拟

凌 空 封永亮 陶文铨

(热流科学与工程教育部重点实验室, 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要 相变材料的低导热性是相变储热器传热过程的主要障碍。在相变材料侧进行强化, 是目前提升相变储热器蓄热速率的主要方法。本文采用有限容积法对带有环状翅片的管式相变储热器的蓄热过程进行了数值模拟, 得到了温度场、相界面随时间的变化。在此基础上, 本文对翅片导热系数、翅片厚度和翅片间距等影响储热速率的因素进行了计算和分析。为相变储热器的优化设计提供了一定的参考。

关键词 PCM; 显热容法; 数值模拟; 强化换热

中图分类号: TK02 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2012)08-1407-04

Numerical Simulation of Latent Heat Storage System With Circular-Finned Tube

LING Kong FENG Yong-Liang TAO Wen-Quan

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract The low thermal conductivity of phase change material (PCM) is the main resistance of heat transfer in latent storage system. Thus, reducing the thermal resistance in PCM side is the major way to increase the heat storage efficiency. This paper carries out a numerical simulation of latent heat storage with circular-finned tube using FVM and the evolution of temperature field and the solid-liquid interface are computed. Some analysis on the factors affecting the rate of heat storage and some basic considerations for the design of latent heat storage system are provided.

Key words PCM; sensible heat capacity method; numerical simulation; heat transfer enhancement

0 引 言

相变储热是利用相变材料 (Phase change materials, PCM) 的相变过程来储存能量的过程。与显热蓄热相比具有体积小、储热密度高、等温性好等优点, 在电厂调峰、余热回收、电子器件冷却等领域有着广泛的利用^[1-5]。

大部分 PCM 的导热系数较小, 这构成了相变储热器的主要热阻^[3]。因此, 目前对相变储热器的传热强化大多在 PCM 侧进行, 如在 PCM 中加入添加剂、采用搅拌器、采用扩展表面等。

许多研究表明, 在 PCM 侧采用翅片能够明显加快传热过程^[6-8], 但效果会受诸多因素的影响^[2,8], 目前对这些因素的影响还缺乏更详细的研究, 这也是本文主要分析的内容。

1 物理与数学模型

1.1 物理模型

一种常见的蓄热系统的结构如图 1 所示, PCM 被封装在壳体和管道之间, 热媒体流经管道, 通过

管壁与 PCM 换热。

为方便分析, 对物理模型作以下假设:

- 1) PCM 为各向同性, 物性只随温度变化;
- 2) 内壁温度为第一类边界条件;
- 3) 忽略液态 PCM 的自然对流^[2,6]。

根据管道分布的规律性, 图 1 中的虚线可以近似地表示各个管道的影响区域。对于此问题, 只需要对一根管道在其影响区域内进行计算。图 2 为采用环状翅片的热媒体管道。管道内径为 8 mm; $\delta = 1$ mm; $H = 10$ mm; δ_1 和 p 分别为翅片厚度和翅片间距, $\delta_1 = 1$ mm, $p = 20$ mm。相变材料为石蜡 RT54, 管壁和翅片材料为金属铝, 物性如表 1 所示。

由于模型的对称性, 可以采用二维圆柱坐标系, 由于结构在轴向的周期性, 可选取图 2 中灰色部分为计算区域。计算区域分为两个部分, 管壁及翅片区域和相变材料区域。

计算区域如图 3 所示, 左边界为热媒管道内壁面, 下边界为翅片对称线, 上边界为相邻两翅片之间

收稿日期: 2011-12-28; 修订日期: 2012-07-16

基金项目: 国家自然科学基金重点基金 (No.51136004)

作者简介: 凌 空 (1987-), 男, 博士研究生, 主要从事流动与传热的数值计算的研究。通信作者: 陶文铨, 教授, E-mail: wqtao@mail.xjtu.edu.cn

PCM 的对称线,右边界为此管道影响区域的边界和翅片的外边界。1~5 为温度监测点。

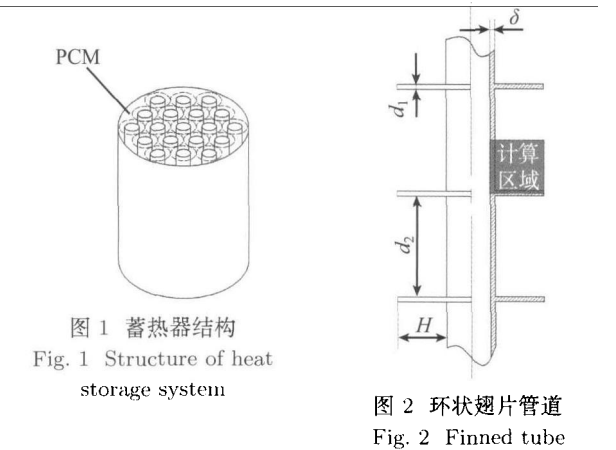
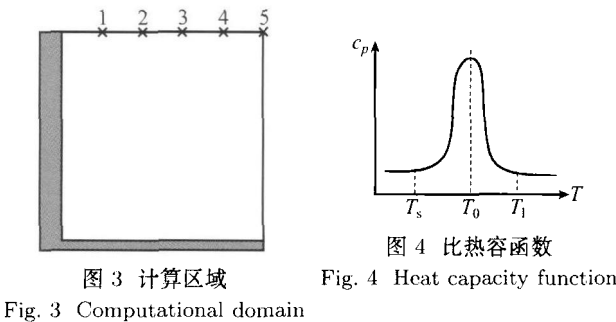


表 1 热物性数据

Table 1 Thermal properties

物性	石蜡 RT54	铝
导热系数/W·(m·K) ⁻¹	0.2	200
参考密度/kg·m ⁻³	830	2700
相变温度/°C	54~56	
相变潜热/J·kg ⁻¹	179000	
固相比热容/J·(kg·K) ⁻¹	1800	900
液相比热容 J·(kg·K) ⁻¹	2400	



1.2 处理相变问题的方法

目前计算固液相变的方法基本可以分为单相和两相 [6] 的方法。两相方法引入液体体积函数,需要迭代求解液体体积函数和温度场。单相方法较简单,用显热容法处理熔化潜热。本文采用单相法。

图 4 为单相法设置比热容的示意图,其中 T_0 为熔点(凝固点),以 T_0 的等温线为相界面, T_s 和 T_l 为近似的相变起始温度和终止温度。为了保证能量平衡,要求满足:

$$\int_{T_s}^{T_l} c_p(T) dT = c_s(T_0 - T_s) + c_l(T_l - T_0) + \gamma \quad (1)$$

c_s 和 c_l 分别为固相和液相的比热容, γ 为相变潜热。

本文将 T_s 和 T_l 分别设为 53°C 和 57°C , γ 的取值为 $179\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, T_s 和 T_l 之间的显热容函数为:

$$c_p(T) = 1800 + 150(T - 53) + 42650 \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} (T - 55) \right) + 1 \right] \quad (2)$$

容易验证,这样的显热容函数满足式 (1) 的要求,而且有很好的连续性,可以使计算更加稳定。

1.3 数学模型

根据以上假设及方法,图 3 所示的二维区域的控制方程为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3)$$

式中, ρ 为密度, λ 为导热系数,由表 1 确定。 c_p 为比热容,在管壁和翅片区域,比热容为定值,在 PCM 区域, c_p 由式 (2) 确定。

边界条件为:左壁面 $T_w = 80^{\circ}\text{C}$;上、下、右边界为绝热面。

初始条件: $T(r, y, 0) = 30^{\circ}\text{C}$

1.4 数值方法

本文用有限容积法进行模拟。采用内节点法 [9] 离散计算区域,用控制容积积分法 [9] 离散方程 (3),扩散项采用中心差分,界面导热系数采用调和平均值 [9] 的方法,非稳态项采用一阶全隐格式。

对计算区域(图 3),PCM 区采用 50×50 的均分网格;管壁和翅片较薄,采用更细的网格(管壁区 10×50 ,翅片区 50×5)。时间步长为 1 s ,总时间为 1500 s 。

2 模型的验证

下面考虑一个一维凝固问题 [4]。半无限大的区域内充满了温度为凝固点的介质,初始状态为液态,壁面温度恒定且低于凝固点,介质在壁面的影响下开始凝固。采用与文献 [4] 中相同的物性及边界条件,如表 2 所示。

表 2 验证模型的条件

Table 2 Parameters in validation model

参数	取值
体积比热容	$2.5 \times 10^6\text{ J}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{K})^{-1}$
导热系数	$2\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
相变潜热	$10^8\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$
凝固点	0°C
壁面温度	-10°C

采用本文所述的方法,用 $-0.5\sim 0^{\circ}\text{C}$ 范围内的显热来代替凝固过程释放的潜热。计算 25 天后的温度分布,计算结果如图 5 所示。

在显热容法中,相变在一个温度范围间内进行,对应液相区和固相区之间的过渡区。在这个问题中,

-0.5 ~ 0°C 的区域为过渡区。由图 6 可以看出, 过渡区在 $x=0.8$ 到 $x=0.9$ 之间。文献 [4] 中的计算的相界面位置为 $x=0.84$ 。本文的计算结果与文献 [4] 基本一致, 证明了本文采用的方法和使用的程序的正确性。

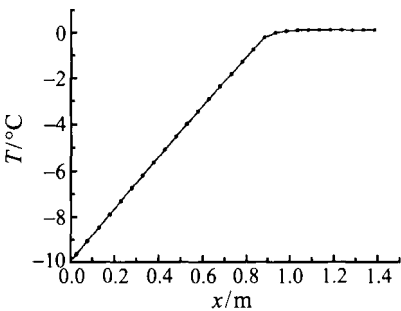


图 5 验证模型的计算结果
Fig. 5 Result of validation model

3 计算结果

3.1 升温规律

PCM 的熔化过程分为三个阶段 [6,8,10]。图 6 为五个温度监测点 (图 3 中的 1~5) 的升温曲线, 每条曲线上都有两个明显的拐点, 将曲线分为三个阶段: 固态显热蓄热阶段、相变阶段和液态显热蓄热阶段。可以看出, 距离管壁越远的点, 越晚进入相变阶段, 相变阶段所需的时间越长。

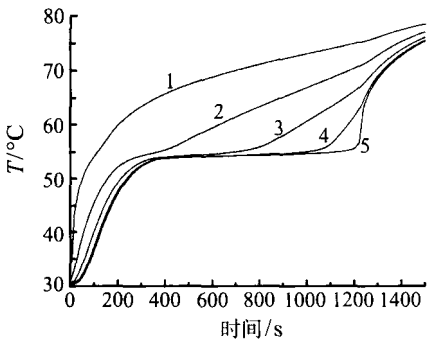


图 6 五个监测点的升温曲线
Fig. 6 Temperature rising in five monitor points

3.2 相变率

在计算过程中同时统计了相变率。对于熔化过程, 相变率指液体体积占总体积的比例。图 7 为相变率随时间的变化以及和相同条件下光管的对比。可以看出, 翅片明显的加快了 PCM 的熔化过程。

3.3 温度场和相界面

图 8 为 $t=20$ s 时的温度场和相界面 (以 55°C 等温线为相界面)。从温度场中可以看出, 只经过了短短的 20 s, 翅片的最低温度也升高到了 70°C 以上,

但 PCM 的大部分区域温度仍接近初始值。因此, 即使经过了翅片强化, PCM 仍然是主要热阻。可以预见, 第一, 还有更好方案, 能够进一步强化传热; 第二, 在此基础上即使适当削弱翅片侧的传热, 也不会对整体传热性能有大的影响。本次的条件 (图 2 与表 1) 称为基准条件, 下一部分将在基准条件的基础上改变参数, 分析各因素的影响。

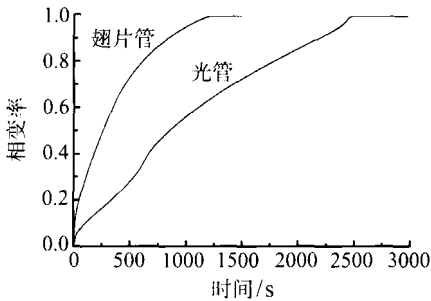


图 7 相变率随时间的变化
Fig. 7 Phase change ratio as progress of time

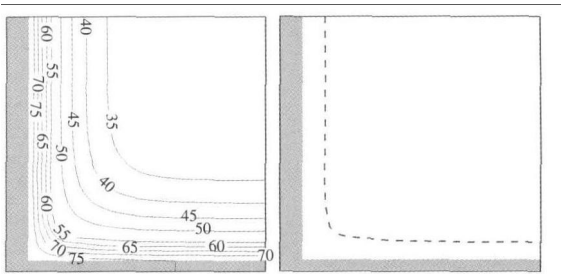


图 8 基准条件下 $t=20$ s 时的温度场和相界面
Fig. 8 Temperature field and interface at $t=20$ s in benchmark condition

4. 影响因素分析

4.1 管壁及翅片导热系数的影响

在基准条件基础上减小翅片导热系数, 进行同样的计算。图 9 表示不同导热系数下 PCM 全部熔化所需的时间。可以看出, 导热系数影响很小。

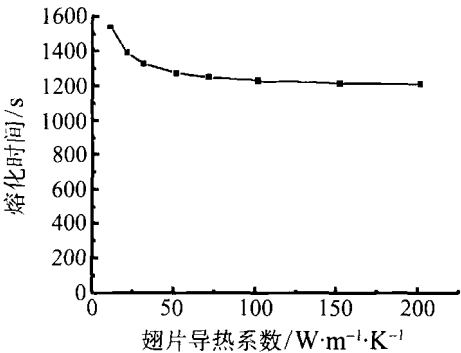


图 9 熔化时间与翅片导热系数的关系
Fig. 9 Melting time under different fin conductivities

4.2 翅片厚度与翅片间距的影响

一种简单的方法是减小翅片间距，但翅片分布越密，PCM 所占的体积就越小，蓄热器的蓄热量减少 [10]。如果同比例地减小翅片厚度和翅片间距，PCM 的体积比不会改变。但是减小翅片厚度会增大翅片的热阻。图 10 是相同条件下各种翅片厚度和翅片间距下计算得到的熔化时间。可以看出，翅片间距的影响非常大，而翅片厚度对整体传热效果基本上没有什么影响。

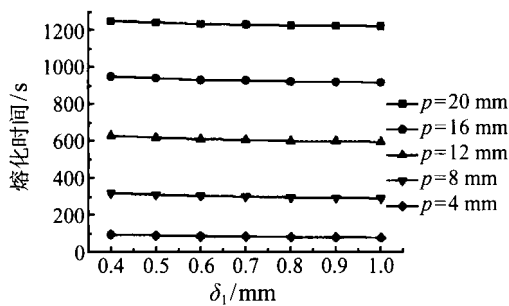


图 10 导热系数为 $200\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
Fig. 10 The case that conductivity equals $200\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$

将翅片导热系数减小为 $20\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ，大部分金属的导热系数都大于此值。进行同样的计算，结果如图 11 所示。可以看出此时翅片厚度对熔化时间有了一定的影响，但翅片间距仍是主要因素。

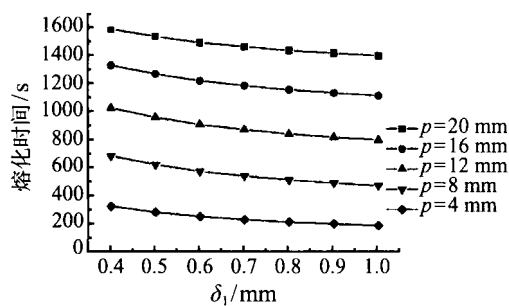


图 11 导热系数为 $20\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
Fig. 11 The case that conductivity equals $20\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$

5 结 论

本文采用显热容法对带有环状翅片的储热器进行了数值计算并得到以下结论：

- 1) 与光管相比，翅片能够明显缩短熔化时间。
- 2) 翅片的导热系数对储热速率影响不大。如果考虑经济性，选择导热系数较小的材料也是合理的。
- 3) 在翅片的布置上，翅片厚度对传热速率影响

不大，翅片间距是最主要的因素。

参 考 文 献

[1] Costa M, Buddhi D, Oliva A. Numerical Simulation of a Latent Heat Thermal Energy Storage System with Enhanced Heat Conduction [J]. Energy Convers, 1998, 39: 319-330

[2] 郭茶秀, 张务军, 魏新利, 等. 板式石蜡储热器传热的数值模拟 [J]. 能源技术, 2006, 27(6): 243-248
GUO Chaxiu, ZHANG Wujun, WEI xinli, et al. Numerical Simulation for Heat Transfer Problem in Paraffin Storage Slab [J]. Energy Technology, 2006, 27(6): 243-248

[3] 王剑锋. 相变储热研究进展 [J]. 新能源, 2000, 22(3): 31-35
WANG Jianfeng. Review of Latent Thermal Energy Storage [J]. New Energy, 2000, 22(3): 31-35

[4] V R Voller. Fast Implicit Finite-Difference Method For The Analysis Of Phase Change Problems [J]. Numerical Heat Transfer, Part B, 1990, 17: 155-169

[5] 王维龙, 杨晓茜, 方玉堂, 等. 潜热储热系统强化传热研究进展 [J]. 可再生能源, 2005, 5: 15-19
WANG Weilong, YANG Xiaoxi, FANG Yutang, et al. A Review on heat Transfer Enhancement of the Latent Heat Storage System [J]. Renewable Energy, 2005, 5: 15-19

[6] 张月莲, 郑丹星. 石蜡相变材料在同心环隙内的基本传热行为 [J]. 北京化工大学学报, 2006, 33: 5-12
ZHANG Yuelian, ZHENG Danxing. Heat Transfer Performance of Paraffin as a Phase Change Material (PCM) in a Concentric Annulus [J]. Journal of Beijing University of Chemical Thechnology, 2006, 33: 5-12

[7] 栗文银, 王启杰. 水平光管及肋管外熔化换热及固-液界面运动规律的实验研究 [J]. 工程热物 理 学 报, 1988, 9: 353-358
LI Wenyin, WANG Qijie. Heat Transfer and Interface Motion during Melting Around a Horizontal Tube With and Without Axial Fins [J]. Journal of Engineering Thermalphysics, 1988, 9: 353-358

[8] 李莉. 相变储热装置传热强化的实验研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2006
LI Li. Experimental Study of Heat Transfer Enhancement of Latent Heat Thermal Energy Storage [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006

[9] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 第 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001
Tao Wenquan. Numerical Heat Transfer [M]. Second Edition. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001

[10] 邹得球, 肖睿, 宋文吉, 等. 一种余热利用相变石蜡储热过程的数值模拟 [J]. 热能与动力工程, 2010, 25: 77-81
ZHOU Deqiu, XIAO Rui, SONG Wenji, et al. Numerical Simulation of the Heat Storage Process of a Waste Heat Utilization-Oriented Phase-Change Paraffin [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010, 25: 77-81

[11] 陈俊. 相变蓄热技术的数值模拟研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2007
CHEN Jun. Numerical Simulation of the Technology of Thermal Storage With Phase Change [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2007