

不同相变材料蓄热特性及液相分数无量纲准则方程式拟合

郑宇豪, 赵明, 王柯

上海理工大学能源与动力工程学院&上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海
Email: 798813713@qq.com

收稿日期: 2021年1月21日; 录用日期: 2021年2月16日; 发布日期: 2021年2月24日

摘要

主要应用数值模拟方法对三套管相变蓄热器进行研究, 为该结构的蓄热器填充三种不同相变材料(RT82、RT50、LA)提供参考。拟合得到无量纲参数和液相拟合分数, 其中低熔点RT50和LA平均努塞尔特数存在上升阶段; 得到熔化过程中不同相变材料液相分数、不同蓄热方式的 $S_{te} F_o R_a^{\frac{1}{6}}$ 相关函数; 通过不同斯蒂芬数对所得拟合函数验证, 结果表明该模型液相分数函数在 S_{te} 为0.0765~0.6060范围内适用度高; 低于熔点的初温, 引入初温参数 $S_c^{\frac{1}{4}}$, 拟合得到液相分数的 $S_{te} F_o S_c^{\frac{1}{4}} R_a^{\frac{1}{6}}$ 相关函数。

关键词

相变材料, 换热器, 数值模拟, 液相分数拟合

The Heat Storage Characteristics of Different Phase Change Materials and the Liquid Phase Fraction Dimensionless Criterion Equation Fitting

Yuhao Zheng, Ming Zhao, Ke Wang

School of Energy and Power Engineering & Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai
Email: 798813713@qq.com

Received: Jan. 21st, 2021; accepted: Feb. 16th, 2021; published: Feb. 24th, 2021

Abstract

The main application of numerical simulation method is to study the three-tube phase change heat accumulator, which provides a reference for filling the heat accumulator with three different phase change materials (RT82, RT50, LA). Dimensionless parameters and liquid phase fitting fractions are obtained by fitting. Among them, low melting point RT50 and LA average Nusselt number have a rising stage. $S_{te} F_o R_a^{\frac{1}{6}}$ for different phase change materials and different heat storage methods during the melting process are obtained. Correlation function is verified by the fitting function and obtained by different Stephen number pairs, the results show that the liquid fraction function of the model has high applicability in the range of 0.0765~0.6060 of S_{te} ; the initial temperature below the melting point is introduced. The temperature parameter $S_c^{-\frac{1}{4}}$ is fitted to obtain the $S_{te} F_o S_c^{-\frac{1}{4}} R_a^{\frac{1}{6}}$ correlation function of the liquid fraction.

Keywords

Phase Change Material, Heat Exchanger, Numerical Simulation, Liquid Fraction Fitting

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

相变蓄热技术是利用相变材料(Phase Change Materials, PCM)发生相变时的特点进行蓄/放热, 即当PCM 熔化时, 直接从热源吸收能量储存, 凝固时, 以释放潜热的形式释放储存的能量。相变蓄热技术具有装置设计简单、蓄热密度高、蓄热温度相对恒定和易于管理等优点, 具有广泛的应用前景, 所以掌握相变材料蓄/放热过程中的传热规律显得越来越重要。

在相变蓄热器结构设计和优化方面, 研究者多采用添加肋片的形式增强蓄/放热。如 Agyenim 等[1]通过实验方法研究了套管式蓄热器中纵向翅片和轴向翅片的蓄热性, 得出了纵向肋片蓄热性能优于轴向肋片的结论。杨莺和梁艳南等[2]通过定量测试不同工况下管壳式蓄热器蓄热性能, 发现内管传热量与管内流体温度线性增加, 进一步为套管蓄热器纵向翅片设计提供了依据。李永辉等[3]在螺旋式蓄热器的圆管表面添加了矩形翅片, 经过实验测定, 蓄热时间相对光滑圆管的结构减少了 1/3。Yuan 等[4]通过数值方法研究了相变蓄热器内部纵向肋片角度设置对蓄热器蓄热性能的影响, 结果表明竖直放置肋片可以更好地提高换热效率。J. Vogel 等[5]建立了一种 HTF 与存储区域之间耦合瞬态热传递的模型, 对特定肋片的换热特性进行了研究。Nitin Kukreja 等[6]研究了壳内融化的螺旋管式相变蓄热器, 探究了不同的进口水温对蓄热效率的影响。Jasim Abdulateef 等[7]研究无翅片管 LHSU, 纵向翅片管和圆形翅片管的蓄热性能, 后两者的总蓄热时间分别减少了 69%和 55%, 实验表明圆形翅片管的带电热负荷运行性能提高了 2.1 倍。Xiaoling Cao 等[8]从入口温度, 质量流量和相变温度对传热过程的影响研究了三个套管蓄热器, 赵明等[9]研究发现安装分形肋片的相变蓄热器可使蓄、放热时间缩短, 可逆性更好, 换热效率更高, 为本文研究采取内部纵向肋片的三个套管蓄热器提供了依据。

因为相变材料自身的导热系数较低, 为改进相变材料性质, 研究者多对相变材料进行合成改良, 如

部分科研人员选择用石墨作为相变材料的定型材料进行合成,如高丽媛等[10]在石蜡中分别添加不同体积分数的纳米石墨烯和纳米石墨片,通过两步法制备纳米颗粒复合相变材料,结果表明,对于导热为主导的凝固过程,复合相变材料的凝固速率相对于纯石蜡有提升作用;对于融化过程,导热和对流共同作用决定融化速率是否被强化。赵思颢等[11]采用熔融共混法制备了癸酸/膨胀石墨定型相变材料(DA/EG-PCMs)、月桂酸/膨胀石墨定型相变材料(LA/EG-PCMs)和石蜡/膨胀石墨定型相变材料(PA/EG-PCMs),发现在膨胀石墨的高导热网络结构包覆下,三种膨胀石墨基定型相变材料相变温度提前,耐久性提高,提高了 PA/EG-PCMs 热稳定性。李云涛等[12]以膨胀石墨(EG)为载体,石蜡为相变材料,利用 EG 对石蜡良好的吸附性,制备了膨胀石墨基复合相变材料,经过测试表明,EG 的质量分数应控制在 10%左右能保证相变材料的结构稳定和优良性能。蒋自鹏,铁生年[13]以复合芒硝(SCNa)为相变材料,膨胀石墨为载体,采用真空吸附法制备出导热增强型膨胀石墨/复合 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 定型相变材料。试验结果表明:表面活性剂 OP-10 (质量分数 5%)的加入能有效提高膨胀石墨和复合 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 相变材料的结合稳定性,表面活性剂的添加对定型相变材料导热系数基本无影响,添加表面活性剂的膨胀石墨定型相变材料导热系数为原材料的 215%。Ming Liu 等[14]将无机盐 PCM 放入多孔材料形成稳定的 PCM,发现孔隙率从底部到顶部的增加,熔融过程可以进一步加速,在下部腔体插入导热增强剂更有效。

部分国内科学家采用多种相变材料制成混合相变材料,如王学晨等[15]以正二十烷、聚乙烯和乙丙橡胶等为原料经熔融挤出,制成正二十烷含量 10%~65%的共混切粒。以正十八烷微胶囊和聚乙烯为原料经熔融挤出,制成微胶囊含量 10%~60%的共混切粒。切粒的热焓随相变材料含量的增高而增大。切粒的熔融指数随相变材料或相变材料微胶囊添加量的增高呈现指数增大或反 S 曲线的形式。

本文采用三种不同相变材料分别为:月桂酸(LA)、氯化石蜡 RT85 和 RT50 填充在具有内部纵向肋片的三套管蓄热器中,主要研究该三种相变材料的蓄热特性,并考虑不同蓄热方式、斯蒂芬数和初温参数在蓄热性能方面的影响,拟合得到液相分数的无量纲准则方程式。

2. 物理模型和数学模型

2.1. 物理模型

该物理模型 1 简图如图 1 所示,三套管式蓄热器内部圆直径为 50 mm,相变材料区域直径为 150 mm,设备整体直径为 200 mm。其中模型 1 为内部相变材料区域安装厚度 1 mm、长度 42 mm 的导热肋片,与文献[16]一致。

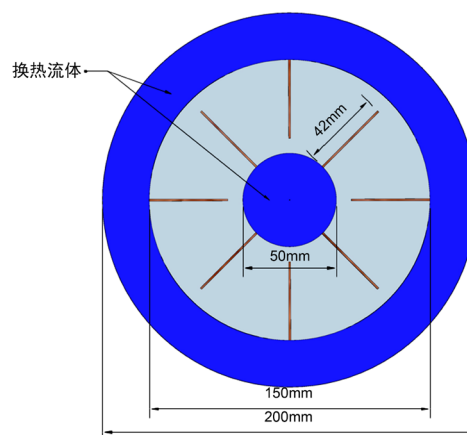


Figure 1. Model 1 structure diagram

图 1. 模型 1 结构简图

2.2. 数学模型

对于融化后的 PCM 流体区域引入无量纲参数进行分析。其中热扩散系数 α 为 $K/(\rho \cdot C_p)$ ， Δt 为计算时间， D 为当量直径 $D_m - D_{in}$ ， K 为相变材料的导热系数， ρ 即通过变物性方程根据平均温度计算得到 PCM 流体平均密度， C_p 为 PCM 定压比热容。

格拉晓夫数 G_r 定义为：

$$G_r = \frac{g\beta(T_w - T_m)D^3}{\nu^2} \quad (1)$$

其中 g 为重力加速度 9.81 m/s^2 ， β 为 PCM 体积热膨胀系数， T_m 为 PCM 相变温度， ν 为运动粘度。

瑞利数 R_a 定义为：

$$R_a = P_r \cdot G_r \quad (2)$$

其中普朗特数 P_r 为 ν/α 。

对于 PCM 区域对流换热引入平均努赛尔数 \overline{Nu} ，定义如下：

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h} \cdot D}{k} \quad (3)$$

其中 \bar{h} 为 PCM 材料液相流体的平均对流传热系数。

2.3. 数值计算方法和模型考核

2.3.1. 数值计算方法

采用 ANSYS Fluent 中融化凝固模型进行数值计算工作，该模型利用焓法模型，其中将相变材料的糊状区视为多孔介质，并设孔隙率与液相分数相等。对于固相孔隙率为零且速度为零。对于糊状区，由于糊状区孔隙率会不断地减少，从而引起动量的下降。Fluent 中融化凝固模型能够模拟大部分融化凝固现象，包括融化、凝固、结晶、晶体生长和连续铸造等问题。此外，速度与压力采用 SIMPLEC 算法，压力项采用 PRESTO 方法离散，对流项采用 QUICK 格式离散，能量为一阶迎风格式。压力、密度、速度、液相分数、能量亚松弛因子分别设为 0.3、0.5、0.3、0.9 和 0.6。求解时间步长为 0.5 s。

2.3.2. 模拟方法验证

为了验证本文数值计算方法的正确性，模型 1 的计算结果对文献[16]中实验结果进行对比。模拟结果如图 2 所示。

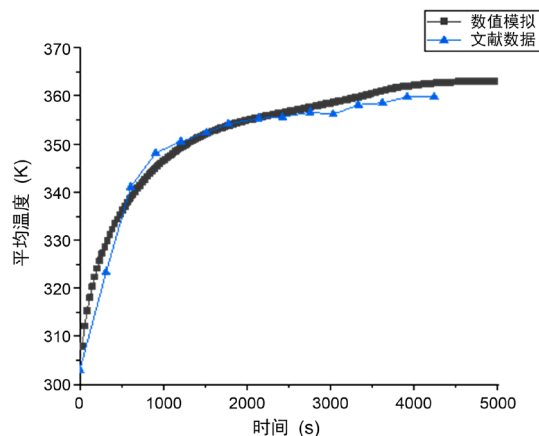


Figure 2. Comparison of numerical simulation results and literature data

图 2. 数值模拟结果和文献数据对比

由图 2 可知，蓄热工况时，数据相差 3.97%。由此可知，本文采用模型准确可靠，可以利用该模拟方法对三套管相变蓄热换热器进行模拟研究。

2.3.3. 物性条件

- 1) 相变材料相变过程中采用层流模型，为低速非稳态不可压流动过程；
- 2) 相变材料和管壁材料为均质和各向同性；
- 3) 不考虑粘性耗散，密度采用 Boussinesq 假设，物性参数如表 1：

Table 1. Physical property parameter table

表 1. 物性参数表

名称	月桂酸(LA)	RT82	RT50
固体密度(kg·m ⁻³)	867.55	950	880
液体密度(kg·m ⁻³)	856	770	760
定压比热容(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	2300	2000	2000
相变潜热(J·kg ⁻¹)	173800	176000	168000
相变温度(K)	317.37	350.15	318
导热率(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.147	0.2	0.2
动力粘度(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.00346	0.03499	0.005302
热膨胀系数/(1·K ⁻¹)	0.00615	0.001	0.0006

3. 不同相变材料的蓄热特性

3.1. RT82、RT50、LA 相变材料的蓄热特性

为研究 RT82、RT50、LA 材料在三套管蓄热器中融化过程，分别计算相变材料区域平均温度和液相分数。计算结果如图 3 所示。

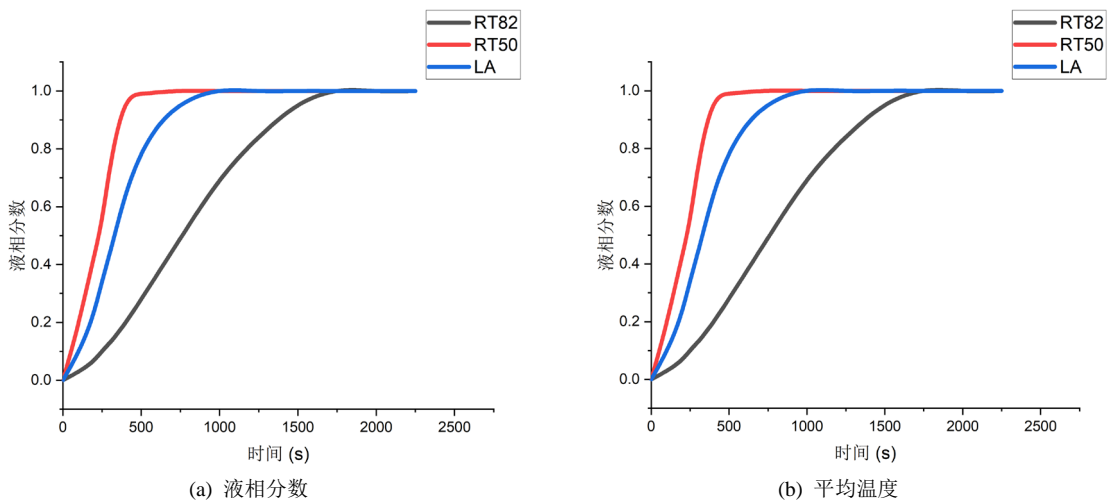


Figure 3. RT82, RT50, LA melting process

图 3. RT82、RT50、LA 融化过程

如图 3(b)可知，RT82 材料在加热温度为 90℃边界条件下的平均温度变化曲线，由于 RT82 材料熔点在 350.15 K 到 358.15 K 之间，材料区域在加热至 1000 s 后平均温度变化减小，并且逐渐接近与 363.15 K。

由图 3(a)可知, RT82 材料在加热至 1800 s 左右融化完毕。

如图 3 可知, RT50 由于熔点相对于 RT82 材料较低, 同样在 T_w 为 363.15 K 条件下, 迅速融化。整体完全融化时间为 400 s。 R_a 最大值为 3.88×10^8 , G_r 最大值为 7.3×10^6 , 液态相变材料的对流属于层流。

如图 3 可知, 由于 LA 材料熔点为 317.15 K, 在 $T_w = 363.15$ K 的条件下融化迅速, 在 750 s 时接近壁面加热温度 363.15 K, 导致换热强度减弱, 温度变化减缓。随着温度不断升高, 整体完全融化所需时间为 800 s, 大于 RT50 但小于 RT82。 R_a 最大值为 6.08×10^8 , G_r 最大值为 7.28×10^6 , 属于层流。

3.2. 液相对流对蓄热特性的影响

相变材料区域无量纲参数统计结果如图 4 所示。

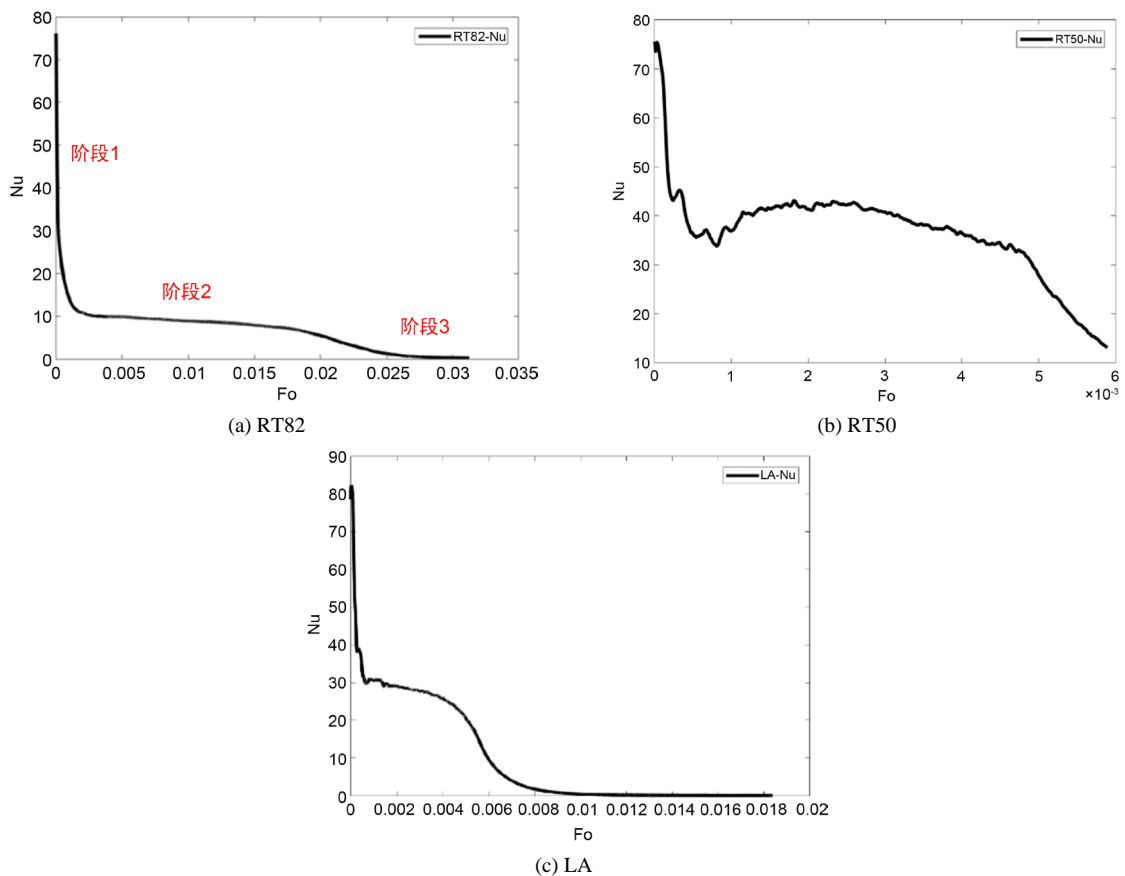


Figure 4. \overline{Nu} change of Phase change material heat storage process graph

图 4. 相变材料蓄热过程 \overline{Nu} 变化图

由图 4(a)可知, 在以 F_o 为时间变化参数的加热过程中, \overline{Nu} 在变化过程中分为三个阶段。在初期阶段 1, 通过融化而产生了对流换热强度较高 RT82 液相薄层, 此时 \overline{Nu} 数值较高。随着温度不断升高, PCM 不断融化, 所形成的薄层逐渐变厚, 此时对流换热强度急速下降。在中期阶段 2, 由于液相 RT82 大量产生, 温度变化相对较大, \overline{Nu} 不再减小, 小幅增加后趋于平缓, 此时对流换热强度仍占主导地位。后期阶段 3 由于温度变化趋于平缓, 蓄热器存在部分 PCM 难以融化的情况, 传热过程以对流换热强度迅速下降。当温度接近加热壁面温度时, \overline{Nu} 趋近于 0。其中, 计算结果 R_a 最大值为 1.26×10^7 , G_r 最大值为 3.6×10^4 , 表明 PCM 自然对流为层流, 符合假设。

由图 4(b)可知, RT50 的 \overline{Nu} 变化与 RT82 相同, 分为三个阶段。而 RT50 的变化波动较大, 其中阶段 2 存在 \overline{Nu} 变化存在上升区间。这是由于 RT50 的熔点较低, 在相同温度边界条件下对流换热效应更大。在第 2 阶段中, 大量的液相 RT50 生成提高该阶段前期的自然对流强度, 第二阶段的对流强度相较其他两种相变材料较高。

如图 4(c)所示, \overline{Nu} 变化与 RT82 相同, 分为三个阶段。其中第 2 阶段与 RT50 材料相同存在上升区间。由于 LA 材料熔点最低, 融化最快, 因此其 \overline{Nu} 第 2 阶段时间最短。

综上所述, 三种 PCM 在三套管蓄热器模型融化过程中, 液态材料首先产生于加热面和金属肋片附近形成, 此时自然对流效应最强。随着温度升高, 液相增多的同时, 自然对流强度迅速减小。随后在一定范围内小幅增长后稳定, 最终随着整体温度接近壁面不断降低。受相变温度影响, 三种材料融化速率不同, 其中 RT50 完全融化所需时间最短, RT82 最长。根据 R_a 、 G_r 计算结果流体流动均为层流。

4. 液相分数的无量纲准则方程式拟合

4.1. 不同相变材料液相分数拟合

由不同 PCM 蓄热过程的液相分数变化可知, 三套管模型中相变材料的融化具有相同的融化阶段。为研究 PCM 液相分数的变化特性, 引入无量纲参数斯蒂芬数 S_{te} 。

其中斯蒂芬数 S_{te} 定义为:

$$S_{te} = \frac{C_p (T_w - T_m)}{L} \tag{4}$$

C_{pl} 为液态比热容, L 为相变材料的相变潜热值, T_m 为 PCM 的相变温度, T_w 为加热表面温度。PCM 液相分是函数 f 与无量纲参数 S_{te} 、 F_o 、 R_a 相关, 其中定义变量 x 为 $S_{te} F_o R_a^{\frac{1}{6}}$ 。

将 x 与液相分数拟合, 结果如图 5 所示。

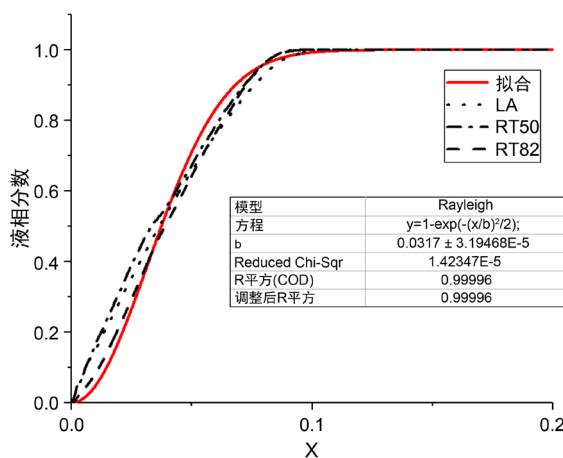


Figure 5. x Fitting with liquid fraction
图 5. x 与液相分数拟合

根据图 5 可知, 不同 PCM 的液相分数与变量 x 具有较强联系性。由于 PCM 液相分数具有从 0 到接近 1 的变化趋势, 因此采用 Rayleigh 曲线模型, 根据三条曲线数据拟合得到 f 方程:

$$f = 1 - e^{-\frac{\left(\frac{x}{0.0217}\right)^2}{2}} \tag{5}$$

其中 x 为 $S_{te} F_o R_a^{\frac{1}{6}}$ 。 $0.1478 \leq S_{te} \leq 0.606$ ， $2.14 \times 10^7 \leq R_a \leq 6.09 \times 10^8$ 。方程相关系数 R^2 为 0.99996，拟合程度非常高。

4.2. 不同蓄热方式液相分数拟合

基于上述部分可知通过三套管内外壁面加热可使 PCM 迅速融化，模型实际使用过程中，由于内外管采用独立的流速控制，因此可以采用单独的加热方式。其中边界条件为：

- 1) 只有内部加热： $T_w = T_{in} = 363.15 \text{ K}$ ， $R = R_m$ ； $q = 0$
- 2) 只有外部加热： $T_w = T_{out} = 363.15 \text{ K}$ ， $R = R_m$ ； $q = 0$

在初始温度为 300.15 K 的工况下分别统计不同蓄热方式的液相分数变化。结果如图 6 所示。

由图 6 可知，由于三套管蓄热器外壁面接触面积大于内部面，因此单独采用外壁面加热比单独采用内壁面具有更高的蓄热效率。内外壁面同时加热的情况下蓄热效率为最高。因此，针对三套管蓄热器不同蓄热方式的液相分数变化分别拟合。

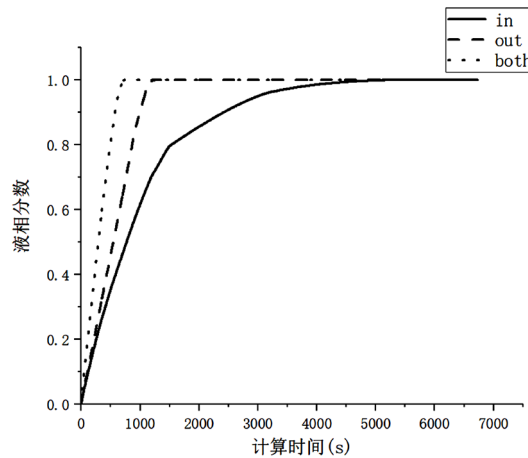


Figure 6. Liquid fraction of different heat storage methods
图 6. 不同蓄热方式的液相分数

其中内部壁面蓄热方式的液相分数拟合结果如图 7 所示。

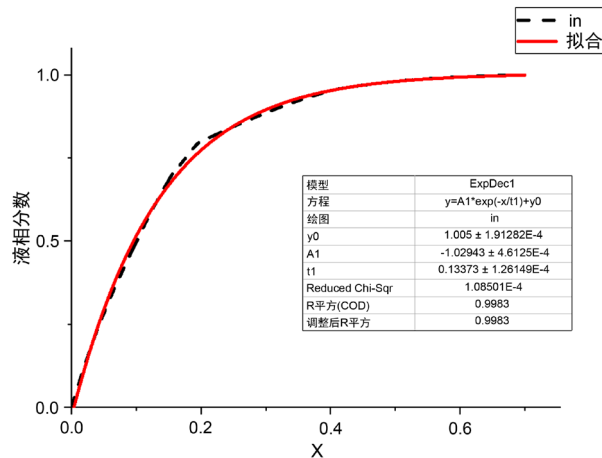


Figure 7. Fitting results of liquid phase fraction of the internal heat storage method
图 7. 内部壁面蓄热方式液相分数拟合结果

由图 7 可知，对于内管单独加热情况，采用液相分数 f_{in} 与变量 x 的拟合函数如下：

$$f = 1 - 1.03e^{\frac{-x}{0.134}} \tag{6}$$

相关系数 R^2 为 0.9983。其中 $x = S_{te} F_o R_a^{\frac{1}{6}}$ ， $S_{te} = 0.606$ ， $7.2 \times 10^7 \leq R_a \leq 7.7 \times 10^7$ 。外部壁面蓄热方式的液相分数拟合结果如图 8 所示。

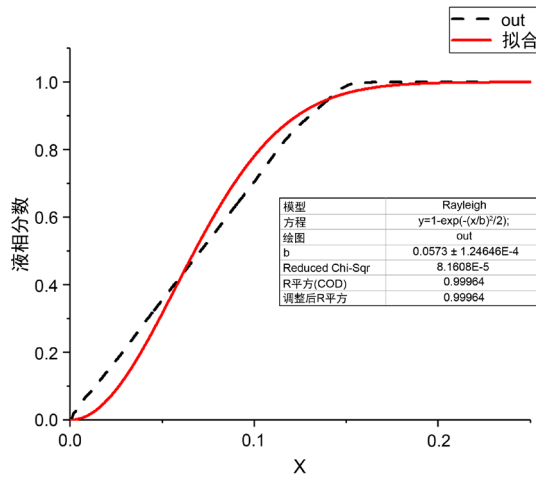


Figure 8. Fitting results of liquid fraction of external wall heat storage method
图 8. 外部壁面蓄热方式液相分数拟合结果

由图 8 可知，对于外管单独加热情况，液相分数 f 与变量 x 的拟合函数如下：

$$f = 1 - e^{-\frac{\left(\frac{x}{0.0573}\right)^2}{2}} \tag{7}$$

其中相关系数 R^2 为 0.9964。其中 $x = S_{te} F_o R_a^{\frac{1}{6}}$ ， $S_{te} = 0.606$ ， $7.4 \times 10^7 \leq R_a \leq 7.7 \times 10^7$ 。

4.3. 不同斯蒂芬数对拟合函数的影响

在三套管式相变蓄热器中，为进一步研究 S_{te} 对该模型的蓄热性能的影响，在填充 LA 材料时，加热

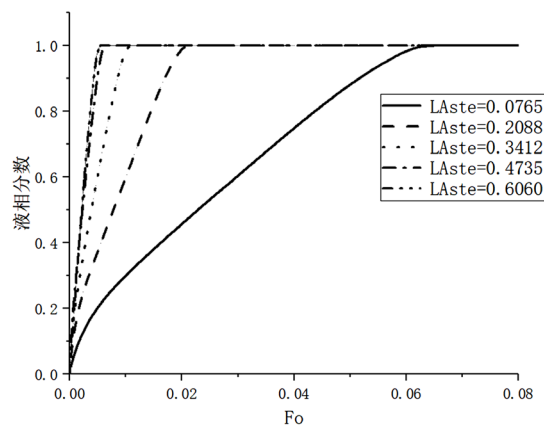


Figure 9. Variation of liquid fraction fractions with different Stephen numbers
图 9. 不同斯蒂芬数的液相分数拜变化

温度分别选取为 50°C、60°C、70°C、80°C、90°C。其对应的斯蒂芬数分别为 0.0765、0.2088、0.3412、0.4735、0.6060，液相分数统计结果如图 9 所示。

如图 9 可知，在 0.0765~0.6060 的区间内，斯蒂芬数对相变材料的融化速率影响较大，因此可以通过增加斯蒂芬数来提高 LA 材料融化速率。但从图 9 同样可看出，虽然增加斯蒂芬数在某个范围内可以迅速增加融化速率，但斯蒂芬数到达某个数值后，融化速率并没有很大改变，对应的斯蒂芬数从 0.4735 增加到 0.6058 时，融化速率并未有明显提高，说明加热温度并非愈高愈好。

带入不同斯蒂芬数的 x 与液相分数拟合公式(5)计算，计算结果如图 10 所示。

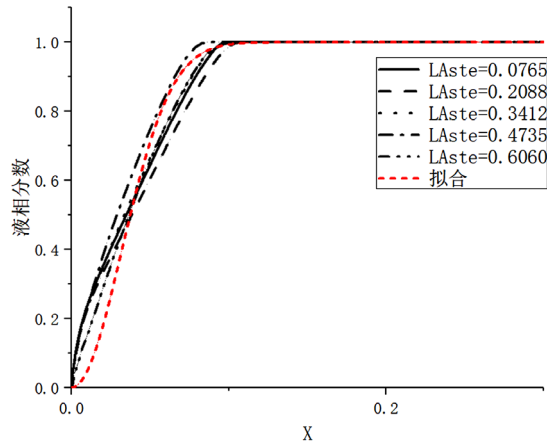


Figure 10. Liquid phase fraction fitting with different Stephen numbers

图 10. 不同斯蒂芬数的液相分数拟合

如图 10 可知，液相分数的无量纲准则方程式 f 在不同 S_{te} 条件下所得的液相分数变化数据具有良好相关性，因此 0.0765~0.6060 的范围内具有良好的适用性。 R_a 数变化范围为 $7.7 \times 10^7 \sim 6.1 \times 10^8$ 。

4.4. 不同初温参数对拟合函数的影响

由于三套管模型在实际使用中存在不同的初始温度，因此引入低于熔点的初温参数定义如下：

$$S_c = \frac{C_p (T_m - T_{init})}{L} \quad (8)$$

C_p 为比热容， L 为相变材料的相变潜热值， T_m 为 PCM 的相变温度， T_{init} 为初始温度。

初始温度 280.15 K、285.15 K、290.15 K、295.15 K、300.15 K 对应 S_c 参数为 0.2279、0.2941、0.3602、0.4264、0.4926。

分别模拟 LA 材料不同初温下的液相分数变化，模拟结果如图 11 所示。

由图 11 可知，不同的初始温度导致蓄热器 PCM 液相分数在融化后期变化较大，其中 T_{init} 越低，PCM 完全融化时间越长。这是由于更低初始温度需要吸收更多的热量才能达到相变温度。

考虑初温参数对液相分数的无量纲准则方程式的影响，在因变量 x 中加入 S_c^{-4} 参数，即 $x = S_{te} F_o S_c^{-4} R_a^{-\frac{1}{4}}$ 。将 x 与液相分数进行拟合。拟合结果如图 12 所示。

由图 12 可知，不同 S_c 计算所得 x 与对应的液相分数吻合度很高。根据数据拟合函数为：

$$f = 1 - e^{-\frac{\left(\frac{x}{0.04756}\right)^2}{2}} \quad (9)$$

其中 $S_{te} = 0.606$, $5.64 \times 10^8 \leq R_a \leq 6.09 \times 10^8$, $0.2279 \leq S_c \leq 0.4926$ 。
 相关系数 R^2 为 0.9795。由表可知, 函数与数据相关性较高。

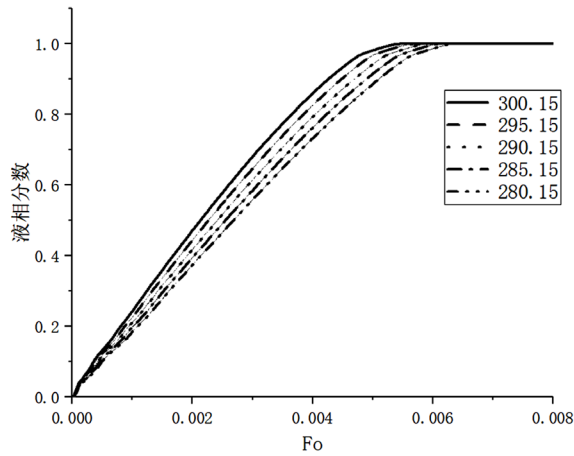


Figure 11. Liquid fraction of LA materials at different initial temperatures
图 11. 不同初温 LA 材料液相分数

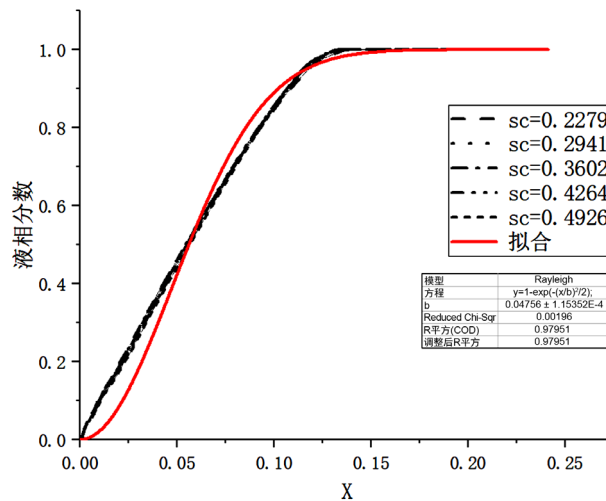


Figure 12. Fitting results of different S_c parameters
图 12. 不同 S_c 参数拟合结果

5. 结论

本文通过数值方法建立了三套管相变蓄热换热器模型, 研究了三种不同熔点的相变材料(LA、RT50 和 RT82)的蓄热特性, 获得了如下结论:

- 1) 不同熔点的相变材料虽然自然对流强度变化存在较大差异, 但存在相似的熔化阶段。
- 2) 对不同相变材料、内外管不同蓄热方式、不同蓄热温度拟合得到不同相变材料熔化过程的液相分

数相关函数(自变量 x 为 $S_{te} F_o R_a^{1/6}$), 函数准确度较好, 可以预测在该模型内相变材料的液相分数变化。

- 3) 考虑低于熔点的初温参数对蓄热器模型的影响, 通过引入初温参数 $S_c^{-1/4}$, 进而拟合得到液相分数与 $S_{te} F_o S_c^{-1/4} R_a^{1/6}$ 相关函数, 可用于预测。

基金项目

国家自然科学基金 NO. 51306120。

参考文献

- [1] Agyenim, F., Eames, P. and Smyth, M. (2009) A Comparison of Heat Transfer Enhancement in a Medium Temperature Thermal Energy Storage Heat Exchanger Using Fins. *Solar Energy*, **83**, 1509-1520.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.04.007>
- [2] 杨莺, 梁艳南, 周子民, 等. 壳管式相变蓄热器传热效率研究[J]. 热科学与技术, 2011(3): 226-230.
- [3] 李永辉, 马素霞, 谢豪. 管翅式相变蓄热器性能的实验研究[J]. 可再生能源, 2014(5): 574-578.
- [4] Yuan, Y., Cao, X., Xiang, B., *et al.* (2016) Effect of Installation Angle of Fins on Melting Characteristics of Annular Unit for Latent Heat Thermal Energy Storage. *Solar Energy*, **136**, 365-378.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.014>
- [5] Vogel, J., Keller, M. and Johnson, M. (2020) Numerical Modeling of Large-Scale Finned Tube Latent Thermal Energy Storage Systems. *Journal of Energy Storage*, **29**, Article ID: 101389. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101389>
- [6] Kukreja, N., Gupta, S.K. and Rawat, M. (2020) Performance Analysis of Phase Change Material Using Energy Storage Device. *Materials Today: Proceedings*, **26**, 913-917. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.139>
- [7] Abdulateef, J., Mahdi, M.S. and Hasan, A.F. (2020) Experimental Evaluation of Thermal Performance of Two Different Finned Latent Heat Storage Systems. *Case Studies in Thermal Engineering*, **21**, Article ID: 100675.
- [8] Cao, X.L., Zhang, N., Yuan, Y.P. and Luo, X.L. (2020) Thermal Performance of Triplex-Tube Latent He Storage Exchanger: Simultaneous Heat Storage and Hot Water Supply via Condensation Heat Recovery. *Renewable Energy*, **157**, 616-625. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.059>
- [9] 赵明, 田扬, 胡明禹, 张峰鸣. 三套管式相变蓄热器分形肋片设计及(火积)耗散分析[J]. 热能动力工程, 2020, 35(2): 148-154.
- [10] 高丽媛, 杨宾, 郝梦琳, 刘杰梅. 不同石墨填料对相变材料性能的影响[J]. 现代化工, 2019, 39(4): 91-94.
- [11] 赵思懿, 晏华, 李云涛, 汪宏涛, 阚宸玺. 膨胀石墨基定型相变材料的性能研究[J]. 当代化工, 2017, 46(10): 2038-2041.
- [12] 李云涛, 晏华, 汪宏涛, 余荣升. 膨胀石墨基复合相变材料的结构与性能研究[J]. 材料研究学报, 2016, 30(7): 545-552.
- [13] 蒋自鹏, 铁生年. 膨胀石墨/芒硝复合定型相变材料制备及性能研究[J]. 材料导报, 2016, 30(12): 55-60.
- [14] Liu, M., Sun, Y.P. and Bruno, F. (2020) A Review of Numerical Modelling of High-Temperature Phase Change Material Composites for Solar Thermal Energy Storage. *Journal of Energy Storage*, **29**, Article ID: 101378.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101378>
- [15] 王学晨, 张兴祥, 吴世臻, 牛建津. 相变材料及相变材料微胶囊/聚乙烯共混物的结构与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2005(4): 149-152.
- [16] Al-Abidi, A.A., Mat, S., Sopian, K., *et al.* (2013) Experimental Study of PCM Melting in Triplex Tube Thermal Energy Storage for Liquid Desiccant Air Conditioning System. *Energy and Buildings*, **60**, 270-279.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.031>