

文章编号: 1008-1542(2024)06-0573-09

分形翅片对三套管相变蓄热器蓄热性能的影响

唐广通¹, 李欣¹, 蒋静智², 李路江¹, 邵国伟², 李洪涛², 程思远²

(1. 国网河北能源技术服务有限公司, 河北石家庄 050000;
2. 河北科技大学机械工程学院, 河北石家庄 050018)

摘要:为解决传统蓄热器蓄热时相变材料(PCM)区域存在蓄热效率低、熔化不均匀等问题,以加装了 8 根纵向翅片的三套管相变蓄热器为基本结构,保证翅片在蓄热器内所占体积不变,纵向翅片以“Y”字进行分形,利用 FLUENT 软件模拟研究 Y 形翅片长度、分支角度对三套管相变蓄热器蓄热性能的影响。结果表明:三套管相变蓄热器添加分形翅片后,与添加了普通纵向直翅片的结构相比,增大了换热面积,有利于自然对流的发展,有效缩短了 PCM 完全熔化所需时间;综合分析可得,Y 形翅片根部与分支分别占总长度的 25% 与 75%、分支角度为 60° 时为最佳 Y 形翅片结构,PCM 完全熔化速率明显提高,整体蓄热性能得到提升。与普通直翅片蓄热器相比,提出的 Y 形翅片相变材料受热更加均匀,蓄热速率更快,其数值模拟结果可为相变蓄热器的结构优化设计提供一定的参考依据。

关键词: 传热学; 相变蓄热; 分形翅片; 数值模拟; 强化换热; 自然对流

中图分类号: TK172 文献标识码: A DOI: 10.7535/hbkd.2024yx06001

Effect of fractal fins on the heat storage performance of three-casing phase change accumulator

TANG Guangtong¹, LI Xin¹, JIANG Jingzhi², LI Lujiang¹, SHAO Guowei²,
LI Hongtao², CHENG Siyuan²

(1. State Grid Hebei Energy Technology Service Co., Ltd, Shijiazhuang, Hebei 050000, China;
2. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology,
Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to solve the problems of low heat storage efficiency and uneven melting in the phase change material area of the traditional heat accumulator, the influence of the length and branch angle of the Y-shaped fin on the heat storage performance of the three-tube phase change accumulator was simulated and studied by using FLUENT software to simulate the effects of the length and branch angle of the three-tube phase change accumulator with eight longitudinal fins as the basic

收稿日期: 2024-03-10; 修回日期: 2024-06-28; 责任编辑: 张士莹

基金项目: 国家自然科学基金(52206224); 国网河北能源技术服务有限公司科技项目(TSS2023-10); 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2022023)

第一作者简介: 唐广通(1982—), 男, 天津人, 高级工程师, 硕士, 主要从事火电机组网源协调和节能减排方面的研究。

E-mail: 286559587@qq.com

唐广通, 李欣, 蒋静智, 等. 分形翅片对三套管相变蓄热器蓄热性能的影响[J]. 河北科技大学学报, 2024, 45(6): 573-581.

TANG Guangtong, LI Xin, JIANG Jingzhi, et al. Effect of fractal fins on the heat storage performance of three-casing phase change accumulator[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2024, 45(6): 573-581.

structure, ensuring that the volume of the fins in the accumulator remains unchanged, and the longitudinal fins are fractal with the "Y" shape. The results show that the addition of fractal fins in the three-tube phase change accumulator increases the heat exchange area compared with the ordinary longitudinal straight fin structure, which is conducive to the development of natural convection and effectively shortens the time required for the complete melting of PCM. After comprehensive analysis, the root and branches of the Y-shaped fin accounts for 25% and 75% of the total length, respectively, and the branch angle is 60° , which is the best Y-shaped fin structure, the complete melting rate of PCM is significantly improved, and the overall heat storage performance is improved. Compared with the ordinary straight fin heat accumulator, the proposed Y-shaped fin has more uniform heating of the phase change material and faster heat storage rate. The numerical simulation results provide certain data basis for the structural optimization design of the phase change heat accumulator.

Keywords: heat transfer; phase change heat storage; fractal fins; numerical simulation; enhanced heat exchange; natural convection

在“双碳”背景下,利用太阳能是一种较好的低碳方式。太阳能资源总量丰富、清洁且分布范围广泛,但也存在能量密度低、不连续、辐照量季节性差异大的问题。热量存储技术是解决这一问题的有效方法。适时储存,在需要时放出使用,可有效改善能源供求不匹配的问题^[1]。相变蓄热以其蓄热密度大、温度变化范围小等特点成为热量存储领域的关键技术。但受相变材料(PCM)自身物性限制,大部分PCM的导热系数较小,相变蓄热存在蓄热效率低、耗时长的问题,因此高效相变储能成为中国清洁能源领域的研究热点。

目前,研究人员主要从提高PCM导热系数和优化相变储热装置结构2个方向进行研究,以达到强化传热目的^[2]:第1种方法在PCM区域加入较高导热性能的金属基体或纳米材料制备成复合PCM,进而提高PCM自身的导热性能,该方法保持基础PCM的热物性,同时能够增大PCM的换热系数;第2种方法在PCM侧添加翅片,可以增大翅片与PCM的换热面积,进而提高PCM的蓄热速率。在PCM的改良方面,CHEN等^[3]模拟分析了多孔基体和纳米材料对相变储热装置熔化过程的影响,结果表明,单独使用多孔基体可以显著提高熔化速度,同时多孔基体存在的情况下,添加纳米颗粒后会降低熔化性能。ZUO等^[4]以部分填充的扇形多孔基体为研究对象,分析了填充角和厚度变化对熔化行为的影响。蒯子函等^[5]对复合PCM样品的微观结构、储热能力、导热性能等进行了研究与分析,结果表明,硬脂醇完全填充于膨胀石墨(EG)的多孔网络,当硬脂醇密度为 900 kg/m^3 、EG质量分数为28%时导热系数最高,其值为 $28.58\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,相比于纯硬脂醇提高了74倍。ALLEN等^[6]实验研究了在PCM内填充泡沫铝可以有效提高装置整体的传热性能约25%。

在优化储热装置结构方面,YANG等^[7]对管壳式蓄热器中添加环形翅片的蓄热过程进行了数值模拟研究,结果表明,采用环形翅片的蓄热单元熔化时间可减少65%。KARAMI等^[8]采用穿孔圆形翅片对立式管壳相变储热装置热性能的提高进行实验研究发现,由于穿孔翅片对对流流动的阻碍作用较小,使得其时间平均努塞尔数比实心翅片换热器高约30%,熔化时间缩短约7%。MA等^[9]发现与传统的矩形翅片相比,圆形叠合纵向翅片可显著提高PCM的凝固速率,且排列不断减少的圆形叠合翅片的传热性能最佳。赵敬德等^[10]通过数值模拟研究了3套管式相变蓄热器的纵向翅片长度对熔化速率的影响,设置了7种翅片结构,结果表明,相较于光管蓄热器,增加纵向直翅可以有效提高熔化速率,且翅片越长蓄热时间越短。YANG等^[11]模拟研究了光滑管、翅片和金属泡沫管的热性能,进行比较发现,金属泡沫管可以更大程度地强化传热,并且使温度场更加均匀。YAO等^[12]在三管中加入不同分布的纵向三角形翅片,并与传统矩形角翅片的凝固性能进行了对比,优化后的三角形翅片可使系统的凝固时间减少约31%。PENG等^[13]分析了非均匀热流条件下半环形和翅状金属泡沫混合结构的翅片形状对流动的影响,发现三角形翅的性能优于矩形或梯形槽。HUANG等^[14]提出了一种新型的梯形纵向外翅斐波那契数列分布结构,结果表明,采用改进梯形翅片后的PCM凝固时间比传统四边形翅片缩短约45%。

针对上述研究中存在的PCM蓄热时熔化时间长、受自然对流影响相变区域熔化不均匀导致相变蓄热器的整体蓄热效率较低的问题,提出了一种三套管相变蓄热器。该蓄热器三套管结构中换热流体流经中心圆管与外层管道2处区域,增大了PCM与给热面的换热面积,进而有效增强换热速率,改善了相变材料熔化过程中由于自然对流引起的上下不均匀现象。在给热内外壁面增加翅片可以进一步增加给热壁面与

PCM 区域内部的接触面积,熔化速率可显著提高。为了进一步提高 PCM 的熔化速率,改善熔化不均匀现象,将三套管蓄热器内的纵向翅片在保证翅片材料相等情况下进行分形,将分形效果较好的 Y 形翅片引入三套管相变蓄热器的内外壁面。Y 形翅片可进一步增加 PCM 与导热性能较好的金属翅片的接触面积,从而增强 PCM 区域的表观导热系数,强化 PCM 区域的热量传递,提高相变蓄热器的蓄热效率。

1 模型建立

1.1 物理模型

三套管相变蓄热器添加纵向直翅片与分形翅片的物理模型如图 1 所示,该蓄热器高度 H 为 400 mm,中心圆管半径 R_1 为 23 mm,中间套管半径 R_2 为 91 mm,外层筒体的半径 R_3 为 130 mm。8 根纵向翅片等间距交叉布置在中间管与中心圆管的管壁上,翅片的长度 L 为 34 mm,厚度为 3.5 mm,材质为铝,导热率为 $202.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,分形翅片蓄热器的管径与纵向直翅片蓄热器的管径相同,其内部的 Y 形翅片的用料和体积与纵向翅片相同,分支处的厚度为 1.75 mm。换热流体流经中心圆管与外层管道 2 处区域,相变材料封装在中心圆管与中间套管之间的环形空间内。PCM 为 RT50,其主要物性参数见表 1^[15]。本文模拟采用的蓄热器长径比较小,热水通过内外套管加热套管间的 PCM 时,其进出口的温差较小,因此模拟计算时,将模型简化为二维模型进行计算,且将管壁的边界条件设置为恒定壁温边界条件,根据平均太阳能集热器的温度将管壁温度设置为 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

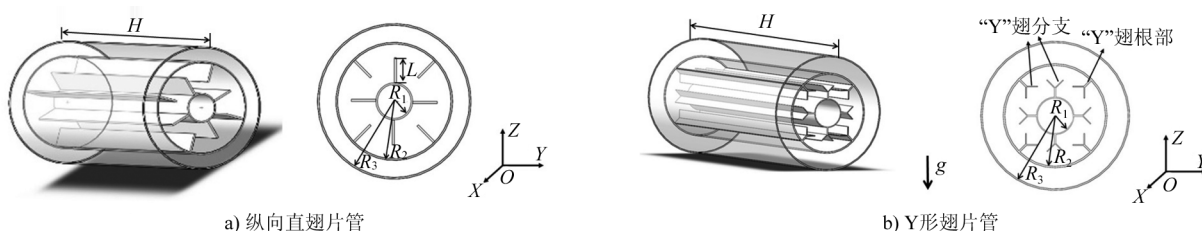


图 1 三套管相变蓄热器物理模型

Fig. 1 Physical model of triplex-tube phase change accumulator

表 1 PCM 主要物性参数

Tab. 1 Physical parameters of phase change materials

状态	密度/(kg/m^3)	相变温度/ $^\circ\text{C}$	相变潜热/(kJ/kg)	导热率/($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)
固态	880	45	168	0.2
液态	770	45	168	0.2

1.2 数学模型与方法

本文采用 FLUENT18.0 对三套管蓄热器的蓄热过程进行数值模拟,将三套管蓄热器简化为二维圆环进行相变传热分析^[16],环形内部 PCM 为计算区域。PCM 在熔化时内部发生的自然对流换热在模拟计算时不能忽略,考虑 PCM 内部发生的自然对流换热,设置重力加速度为 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ 。模拟计算采用 2D、非稳态模型;流体为不可压缩流体,选取 Pressure-Based 求解法。由于相变区域的自然对流的速度缓慢,雷诺数小,选用层流模型。为了降低低雷诺数流场计算过程的残差,选用 Power Law 方法进行求解,除能量方程残差为 10^{-6} 外,其余方程残差均为 10^{-3} 。松弛因子压力设定为 0.3,动量为 0.7,其余均为 1。采用基于焓值方法的 Solidification & Melting 模型模拟计算 PCM 的相变蓄热过程,速度与压力耦合求解方法选用 PISO 算法,压力项采用 PRESTO 方法离散。为在保证准确度的同时节省计算量,根据蓄热器的特点在数值计算中采用以下基本假设^[17]:

- 1) PCM 纯净、各向同性,液态 PCM 不可压缩;
- 2) PCM 的热物性为常数;
- 3) 不考虑 PCM 区域发生的黏性耗散与相变过程的体积变化;

- 4) 换热壁面为恒温, 忽略管壁厚度, 外层筒体设为绝热;
5) 液态的 PCM 满足 Boussinesq 假设, 即只在浮升力项中考虑密度变化。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\rho_p \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta_p \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + S_u, \quad (2)$$

$$\rho_p \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \eta_p \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + S_v. \quad (3)$$

源项:

$$S_u = Au, \quad S_v = Av + \rho_{\text{ref}} g \beta (T - T_{\text{ref}}). \quad (4)$$

式中: $A = -C \frac{(1-\varphi)^2}{\varphi^3 + \varepsilon}$, 其中 C 表示糊状区常数, 根据 PCM 的不同一般取 $10^4 \sim 10^7$ ^[18]; ρ_p 表示相变材料密度; η_p 表示相变材料黏度; ρ_{ref} 表示参考密度; β 表示体积膨胀系数; φ 表示液相率; T_{ref} 表示参考温度; ε 表示小于 0.001 的极小值^[19], 防止分母为 0。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho_p h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_p u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_p v h)}{\partial y} = \text{div}(\lambda_p \text{grad} T_p) + S_p. \quad (5)$$

式中: $S_p = -\left(\frac{\partial(\rho_p \Delta H)}{\partial t} + \text{div}(\rho_p \vec{u} \Delta H) \right)$; h 表示 PCM 的显热焓, $h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_{p,p} dT$; λ_p 表示导热系数, $\lambda_p = \lambda_{s,p} \cdot (1-\varphi) + \lambda_{l,p} \varphi$, 其中 $\lambda_{s,p}$ 表示固态 PCM 导热系数, $\lambda_{l,p}$ 表示液态 PCM 导热系数; $C_{p,p}$ 表示比热容, $C_{p,p} = C_{p,ps} \cdot (1-\varphi) + C_{p,pl} \varphi$, 其中 $C_{p,ps}$ 表示固态 PCM 比热容, $C_{p,pl}$ 表示液态相变材料比热容; ΔH 表示相变潜热。

1.3 网格无关性验证

本文所有模型均采用 ICEM 软件进行结构化网格划分, 为得到最优网格数量, 进行网格无关性验证。由图 2 可以看出, 在大约 700 s 以前, 几种网格数量所计算的结果几乎一致。到蓄热的中后期, 10 200 个网格与 25 200 个网格所对应的液相率相差较大, 说明 10 200 个网格与 17 800 个网格计算结果的误差较大。随着网格密度的增大, 32 800 个网格与 40 200 个网格所对应的液相率曲线几乎重叠, 但是 2 类网格数量所对应的计算时间相差较大, 二者之间的误差最大为 1.8%。为兼顾数值计算的精确性与经济性, 本次模拟采用 32 800 个网格进行模拟计算。

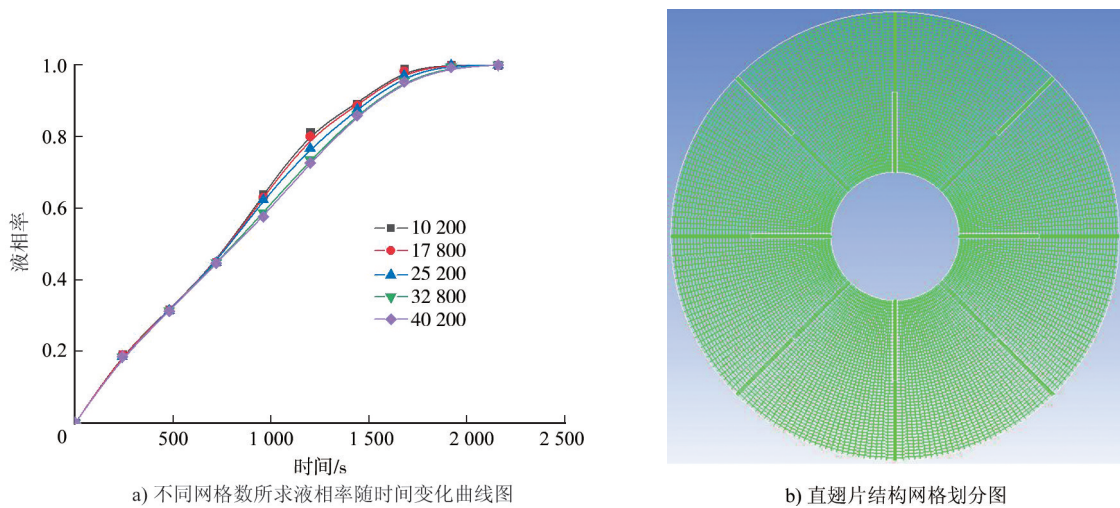


图 2 网格无关性验证与划分图

Fig. 2 Grid independence verification and mesh diagram

1.4 时间步长无关性验证

在仿真模拟过程中,所设置的时间步长越小,计算结果越精确,但是相应计算时间就越长,增加计算成本,因此需要对时间步长进行无关性验证。在网格数相等情况下,将区域离散化的蓄热器模型导入 FLUENT 进行仿真计算,分别设置非稳态的时间步长为 0.05、0.1、0.5 和 1 s 对 PCM 的熔化过程进行数值模拟运算,时间步长和 PCM 熔化时间以及计算时间如表 2 所示。

由表 2 可得,在时间步长为 1 s 时,由于时间步长较大,温度或液相率变化率较大的数值难以捕捉,在计算过程中经常发散。当时间步长为 0.05 s 时,计算用时极长。当时间步长为 0.1 s 和 0.5 s 时,PCM 熔化时间比较接近,在保证准确性的情况下,经济性良好,因此本文选用时间步长为 0.1 s 对离散化的蓄热器进行数值模拟研究。

1.5 可靠性验证

为验证本研究中计算方法与模型简化的可靠性以及假设的合理性,选取文献[20]的实验工况进行 FLUENT 软件数值模拟。实验中的传热介质是水,蓄热材料为 RT82。水温恒定为 358.15 K,取实验监测点进行模拟比较,对比结果如图 3 所示。由图 3 可知,数值模拟所得和实验测得的温度随时间变化的曲线吻合度较高,最大误差不超过 6%,可以认为本研究中利用 FLUENT 软件中的 Solidification & Melting 模型熔化过程进行数值模拟的方法与假设是可靠的。

表 2 时间步长无关性验证
Tab.2 Time step independence verification

时间步长/s	完全熔化时间/s	计算用时/h
0.05	1 993	132
0.1	1 926	71
0.5	1 898	63
1	—	—

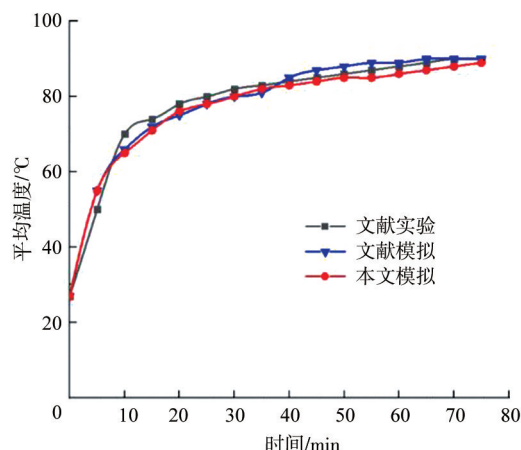


图 3 本文模拟结果与实验结果对比图

Fig.3 Comparison diagram of numerical simulation results and experimental results

2 结果与讨论

2.1 直翅片与 Y 形翅片三套管蓄热器蓄热对比分析

在保证蓄热器内翅片所占腔体体积相同的情况下,对比直翅片与 Y 形翅片三套管蓄热器在蓄热熔化时液相体积分数的变化。蓄热时直翅片与 Y 形翅片三套管相变蓄热器不同时刻的液相体积分数模拟结果如图 4 所示,其为轴向截面的液相图,红色表示 PCM 处于液态,蓝色表示 PCM 处于固态,介于两者之间的黄绿色区域为糊状区。由图 4 可以看出,Y 形翅片管蓄热器的蓄热速率要高于普通直翅片管蓄热

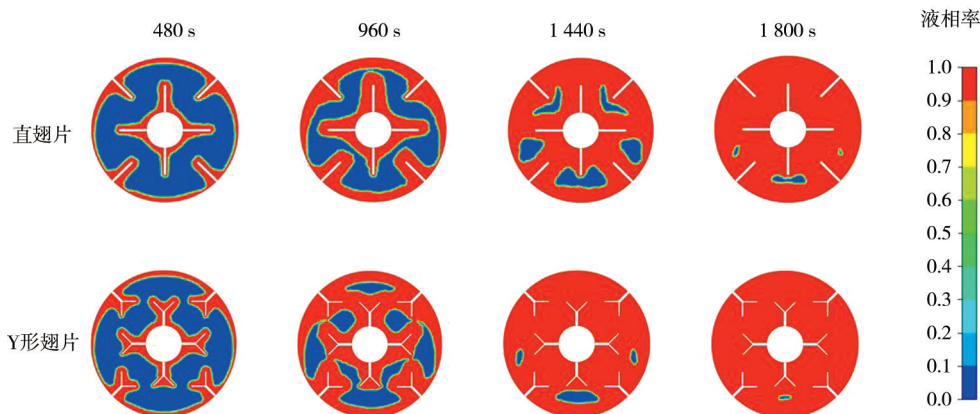


图 4 不同时刻直翅片与 Y 形翅片蓄热器蓄热过程液相率云图对比

Fig.4 Contours of the liquid phase rate of the heat storage process of two different types of accumulators at different times

器,在 1 800 s 时 Y 形翅片管蓄热器未熔化的蓝色区域仅存在于蓄热器下部,而直翅片管蓄热器尚有两侧的 PCM 未完全熔化。由图 4 还可以发现,蓄热过程大致分为 3 个阶段:以导热为主的第 1 阶段持续时间较短,此时 2 种蓄热器中都是靠近内外管换热壁面及翅片附近的 PCM 熔化;随着液态 PCM 的增多,PCM 区域的换热过程进入第 2 阶段,此时受到重力因素的影响,密度较小的液态 PCM 不断向蓄热器的上方聚集,蓄热器上部熔化的液态 PCM 多于下部,另外液态 PCM 向上流动的过程中会伴随着与固态 PCM 的对流换热,此时的换热方式以自然对流换热为主;随着熔化过程的进行,液态 PCM 逐渐增多,自然对流效应逐渐减弱,蓄热过程开始进入第 3 阶段,此时由于相变材料的导热系数较低,远离加热源处的固态 PCM 只能通过导热进行换热,此过程速度较慢。加装 Y 形翅片蓄热器的蓄热速率比直翅片的蓄热速率提高了 15.4%。加装 Y 形翅片后,一方面增大了换热面积,加快导热速度,另一方面,在蓄热中期翅片分支处会形成较多漩涡流动,自然对流效果较强,将进一步增强换热,使 PCM 在蓄热过程中有更高的熔化速率。添加 Y 型翅片的蓄热器自然对流强度强于直翅片结构,自然对流为蓄热器蓄热第 2 阶段的主要传热方式,Y 形翅片增强了自然对流,加强了对管翅上部和两侧 PCM 的冲刷,使得 PCM 迅速熔化,蓄热时间缩短。

上述模拟过程的温度场和速度矢量云图如图 5 所示,图中左半部分为温度云图,右半部分为速度矢量图。此图可以印证 PCM 内部发生的 3 个阶段。根据温度场图可知,在第 1 阶段的液态 PCM 薄层温度较高。随着蓄热的进行,高温的液态 PCM 增多,受到重力因素的影响,密度较小的液态 PCM 不断向蓄热器的上方聚集,此时液态区域 PCM 流速较大,自然对流成为主要的传热方式。由于添加翅片的阻挡作用,在翅片附近会有液态 PCM 的堆积,并在翅片附近形成小漩涡,旋涡越小,数量越多,则 PCM 内部的自然对流效果越强,换热效果越好。Y 形翅片管的流速矢量比直翅片管的大,说明 Y 形翅片管内部 PCM 发生的自然对流换热也更激烈。从温度云图可以看出,添加了 Y 形翅片的蓄热器内部 PCM 的温升更快,且温度场更加均匀。在 1 800 s 时,PCM 温度逐渐接近加热温度,流体流速逐渐变小,自然对流效应逐渐降低,进入了熔化的第 3 阶段,此时添加 Y 形翅片蓄热器内的 PCM 80% 的区域都为 70 °C,只有蓄热器底部存在少部分温度较低区域,而直翅片管的温度场中近一半的温度低于加热温度,上下区域均匀性较差,容易引起蓄热器上部区域过热。此外,由速度矢量图可以看出,此时对流换热效果减弱,只有蓄热器底部有微弱的流动,更多的是依靠导热进行换热,而 PCM 的导热系数较小,此过程较为缓慢。将直翅片进行分形后热源更加分散,PCM 区域温度场更加均匀,PCM 在以导热为主的蓄热过程中有更高的熔化速率,进而使 Y 形翅片管的蓄热速率高于直翅片管。

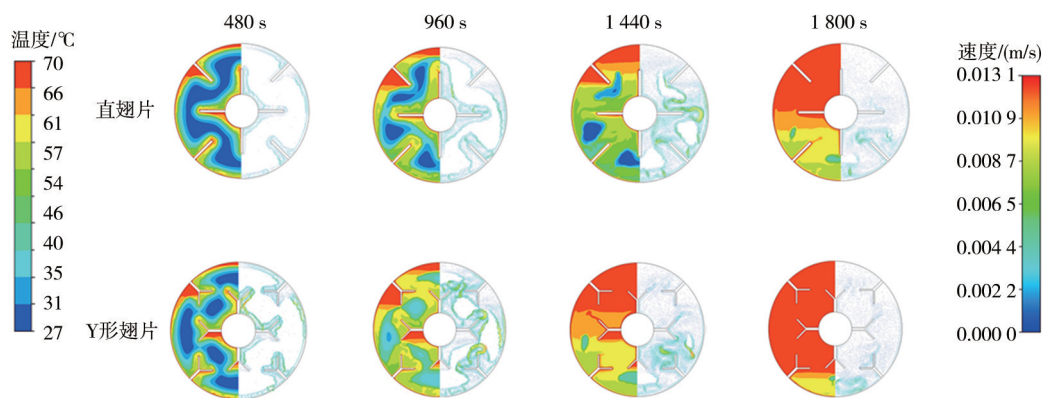


图 5 不同时刻直翅片与 Y 形翅片蓄热器温度和速度矢量云图

Fig. 5 Temperature and velocity vector contours of two different types of accumulators at different times

2.2 Y 形翅片长度对蓄热器蓄热性能的影响

为了探究 Y 形翅片根部与分支处的长度分配对相变蓄热器蓄热性能的影响,保证翅片用料相同,将 Y 形翅片根部按照整体翅长的 25%、50% 与 75% 的长度进行分配,具体翅片尺寸见表 3。

三套管相变蓄热器加装不同型号翅片下,PCM 在

表 3 不同型号 Y 形翅片尺寸

翅片型号	翅片根部长度/mm	翅片分支长度/mm
I	8.5	25.5
II	17.0	17.0
III	25.5	8.5

不同时间呈现的液相云图如图 6 所示。从图中可以看出,随着 Y 形翅片根部的增长,蓄热器的蓄热速率减慢,并且添加翅片型号 I 的蓄热器最先完成蓄热,添加翅片型号 III 的蓄热器最后完成蓄热。Y 形翅片将 PCM 划分为非完全间隔的区域,在熔化时 Y 形翅片附近导热和自然对流联合换热效果较好。由“2.1”直翅片与 Y 形翅片蓄热效果的对比发现,Y 形翅片根部主要对蓄热初期导热为主的阶段有较好的促进作用,在中期液态 PCM 增多后,此结构对 PCM 的整体熔化促进作用不大。此阶段主要依靠 Y 形翅片分支处进行远端传热,所以自 960 s 开始各结构的液相云图就出现了差异:I 结构蓄热器的综合换热效果较好,固态 PCM 已经分成几个小区域,而其他 2 种结构仍有较多 PCM 未熔化,堆积在蓄热器两侧及底部。到 1 440 s 时,I、II 结构的蓄热器内只剩下底部和两侧远离加热面和翅片处的 PCM 未熔化,而 III 结构由于 Y 形翅片分支处的长度较短,无法在蓄热的中后期有效传热,导致其整体蓄热效率较低。

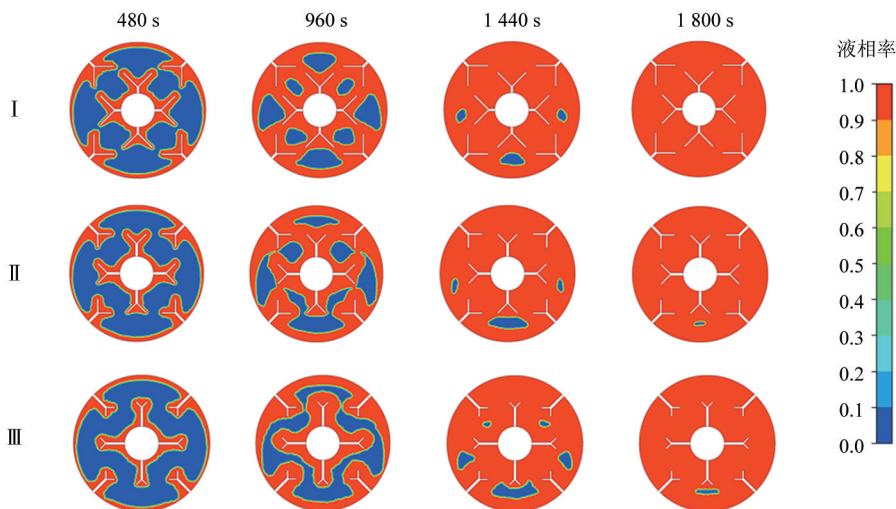


图 6 不同型号 Y 形翅片蓄热器的液相率云图

Fig. 6 Liquid phase rate contour of different Y-shaped fins phase changeaccumulator

不同翅片结构下液相率随时间的变化曲线如图 7 所示,可以看出,添加不同结构翅片的 PCM 液相率曲线均呈现出先陡后缓的趋势。这是因为在蓄热中期,随着高温液态的 PCM 的增多,自然对流效果开始明显,液态的 PCM 由蓄热器的底部向上流动,此过程中发生与固态 PCM 的换热,在导热与自然对流换热的双重作用下,此阶段的蓄热速度较高,液相率曲线较陡。3 种 Y 形翅片结构的液相率曲线均位于直翅片结构的上方,说明添加 Y 形翅片的蓄热器要比添加普通直翅片的蓄热速率更快。在 3 种 Y 形翅片的结构中,型号 III 即根部最长、分支最短的结构蓄热速度最慢,型号 I 与 II 所得到的液相率曲线相差的并不大,但是型号 I 即根部最短、分支最长的结构最先完成蓄热,与型号 II 和 III 结构相比,蓄热速率分别提高了约 7.7% 和 12.5%,其熔化速度最快,故认为型号 I 的 Y 形翅片为最优的尺寸分配结构。

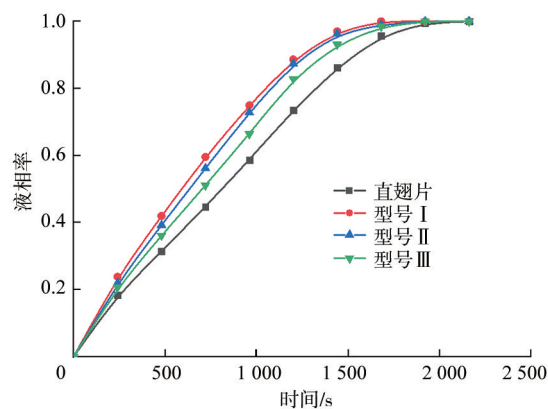


图 7 不同翅片结构下液相率随时间的变化曲线

Fig. 7 Liquid phase fraction with time under different fin structures

2.3 Y 形翅片分支角度对蓄热器蓄热性能的影响

为了进一步探究 Y 形翅片分支角度对相变蓄热器蓄热性能的影响,保证翅片用料相同,将 Y 形翅片分支处按照 30°、60°、90°和 120°的角度进行排列。不同分支角度下的相变蓄热器在不同时刻的液相云图如图 8 所示,可以看出,不同翅片角度下 PCM 的熔化规律相似,均是由双侧的加热面开始向内侧的 PCM 拓展,在不同分支角度 Y 形翅片的强化换热作用下,各结构在蓄热速率上呈现出不同规律。在 960 s 时,分支角度为 60°的翅片结构的蓄热器液化区域大于其他几种结构。各结构蓄热器上部均存在固态的 PCM,但分支角度为 60°的翅片结构上部的固态 PCM 明显小于其他几种结构,原因是在自然对流为主导阶段时,分支角度过

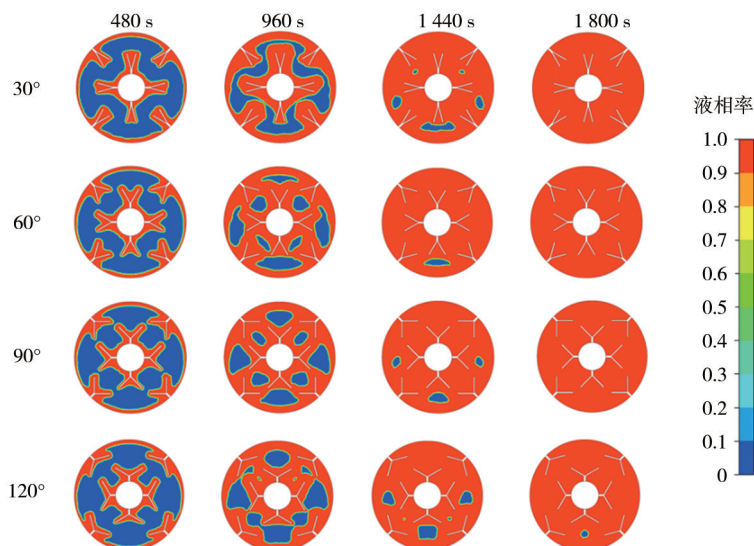


图 8 不同 Y 形翅片分支角度下的液相云图对比

Fig. 8 Comparison of liquid phase contours with different Y-shaped fins branch angles

大会阻碍高温液态 PCM 向上流动,导致蓄热器上部的自然对流效应较低,PCM 熔化较慢。分支角度过小时,会使 Y 形翅片 2 个分支之间的距离过近,热源过于集中,不利于热量与 PCM 的充分交换,也会导致 PCM 熔化较慢。

不同 Y 形翅片分支角度下 PCM 的液相率曲线图如图 9 所示,可以看出,大约在 250 s 前各结构所呈现的液相率曲线走向一致,说明此时 Y 形翅片的分支角度对 PCM 的蓄热影响不大。随着蓄热的进行,分支角度为 30° 结构的蓄热器蓄热速率明显下降,说明分支角度过小不利于换热流体与 PCM 的传热,分支角度为 60° 结构的液相率曲线位于其他曲线的上部,说明此结构蓄热的速率较大,既能保证 Y 形翅片分支处的导热,又能够充分促进自然对流的发展,最终提前完成蓄热。在大约 1 200 s 时,分支角度为 30° 的液相率曲线与分支角度为 120° 的液相率曲线出现交叉点,在 1 200 s 后分支角度为 30° 的蓄热器蓄热速率超过分支角度为 120° 的蓄热器。分支角度为 120° 的蓄热器最后完成蓄热,分支角度为 30° 的蓄热器次之,所以分支角度过大和过小均不宜采用。分支角度为 60° 的 Y 形翅片蓄热器具有良好的导热和自然对流换热的综合性能,所以分支角度 60° 为最优结构。

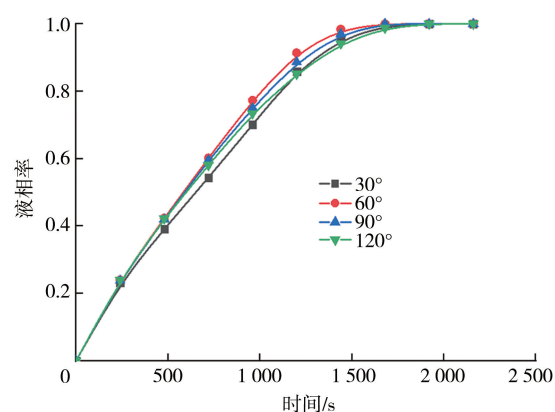


图 9 不同 Y 形翅片分支角度下 PCM 的液相率曲线

Fig. 9 Liquid phase rate curves of PCM at different Y-shaped fins branch angles

3 结 语

利用流体计算软件 FLUENT,以 RT50 作为相变蓄热材料,考虑自然对流对蓄热过程的影响,模拟研究了不同结构的相变蓄热器的蓄热过程,得到的结果和结论如下。

1) 三套管相变蓄热器添加分形的 Y 形翅片后,比添加直翅片的蓄热速率提高了 15.4%。与添加了普通纵向直翅片结构相比,换热面积增大,分支处有利于自然对流的发展,熔化速度更快,PCM 完全熔化速率明显提高。

2) Y 形翅片根部最短、分支处最长的尺寸分配结构导热和对流换热综合性能最好,其蓄热速率最高,与相反分配的尺寸结构相比,蓄热速率提高了 12.5%,与根部和分支相等尺寸结构相比蓄热速率提高约 7.7%,进一步缩短了 PCM 完全熔化所需时间。

3) 随着 Y 形翅片分支角度的增大,PCM 的完全熔化时间先缩短后延长,其中分支角度为 60° 的蓄热器蓄热时间最短,蓄热速率最快,分支角度为 120° 的蓄热器蓄热时间最长。原因是分支角度过大会抑制自然

对流的发展,而分支角度过小导热效果不好,分支角度为 60° 最佳。

但是,通过数值模拟结果也可以看到,PCM 熔化过程中受自然对流的影响,中后期出现蓄热器顶部熔化区域大于底部的现象。后期研究中可以针对翅片的最优分形结构向蓄热器底部进行偏移,探究蓄热器内分形翅片偏心距离对蓄热器内 PCM 的影响。

参考文献/References:

- [1] 巫俊楫,张惠娟,宗涛,等. 浅析我国实现“双碳”目标的挑战与路径举措[J]. 低碳世界,2023,13(11):31-33.
- [2] 秦倩. 相变蓄热装置强化换热技术研究进展[J]. 科技资讯,2023,21(10):137-142.
QIN Qian. Research progress of heat transfer enhancement technology of phase-change heat storage devices[J]. Science & Technology Information,2023,21(10):137-142.
- [3] CHEN Shubo,SALEEM S,ALGHAMDI M N,et al. Combined effect of using porous media and nano-particle on melting performance of PCM filled enclosure with triangular double fins[J]. Case Studies in Thermal Engineering,2021. DOI: 10.1016/J. CSITE. 2021. 100939.
- [4] ZUO Hongyang,WU Mingyang,ZENG Kuo,et al. Numerical investigation and optimal design of partially filled sectorial metal foam configuration in horizontal latent heat storage unit[J]. Energy,2021. DOI: 10.1016/J. ENERGY. 2021. 121640.
- [5] 蒯子函,闫霆,吴韶飞,等. 硬脂醇/膨胀石墨复合相变材料的制备及储热性能[J]. 化工进展,2021,40(sup1):301-310.
KUAI Zihan,YAN Ting,WU Shaofei,et al. Fabrication and heat storage properties of stearyl alcohol/expanded graphite composite phase change materials[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2021,40(sup1):301-310.
- [6] ALLEN M J,BERGMAN T L,FAGHRI A,et al. Robust heat transfer enhancement during melting and solidification of a phase change material using a combined heat Pipe-Metal foam or foil configuration[J]. Journal of Heat Transfer,2015. DOI: 10.1115/1.4029970.
- [7] YANG Xiaohu,LU Zhao,BAI Qingsong,et al. Thermal performance of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit: Role of annular fins[J]. Applied Energy,2017,202:558-570.
- [8] KARAMI R,KAMKARI B. Experimental investigation of the effect of perforated fins on thermal performance enhancement of vertical shell and tube latent heat energy storage systems [J]. Energy Conversion and Management, 2020. DOI: 10.1016/j. enconman. 2020. 112679.
- [9] MA Jie,XU Hao,LIU Shuai,et al. Numerical study on solidification behavior and exergy analysis of a latent heat storage unit with innovative circular superimposed longitudinal fins[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021. DOI: 10.1016/J. IJHEAT-MASSTRANSFER. 2021. 120949.
- [10] 赵敬德,杜畅. 肋片长度对相变材料熔化过程影响的数值模拟[J]. 建筑热能通风空调,2021,40(8):29-31.
ZHAO Jingde,DU Chang. Numerical simulation of the effect of fin length on melting process of phase change materials[J]. Building Energy & Environment,2021,40(8):29-31.
- [11] YANG Xiaohu,YU Jiabang,XIAO Tian,et al. Design and operating evaluation of a finned shell-and-tube thermal energy storage unit filled with metal foam[J]. Applied Energy,2020. DOI: 10.1016/j. apenergy. 2019. 114385.
- [12] YAO Shouguang,HUANG Xinyu. Study on solidification performance of PCM by longitudinal triangular fins in a triplex-tube thermal energy storage system[J]. Energy,2021. DOI: 10.1016/J. ENERGY. 2021. 120527.
- [13] PENG Hao,LI Meilin,HU Fenfen,et al. Performance analysis of absorber tube in parabolic trough solar collector inserted with semi-annular and fin shape metal foam hybrid structure [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021. DOI: 10.1016/J. CSITE. 2021. 101112.
- [14] HUANG Xinyu,YAO Shouguang. Solidification performance of new trapezoidal longitudinal fins in latent heat thermal energy storage[J]. Case Studies in Thermal Engineering,2021. DOI: 10.1016/J. CSITE. 2021. 101110.
- [15] 郑宇豪. 赵明,王柯. 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[J]. 建模与仿真,2021,10(1):128-139.
ZHENG Yuhao,ZHAO Ming,WANG Ke. Equation fitting of dimensionless criterion for heat storage characteristics and liquid phase fraction of different phase change materials[J]. Modeling and Simulation,2021,10(1):128-139.
- [16] 邹勇,仇汝冬,王霞. 石蜡相变材料蓄热过程的模拟研究[J]. 储能科学与技术,2020,9(1):101-108.
ZOU Yong,QIU Rudong,WANG Xia. Simulation study on thermal storage process of paraffin phase change materials[J]. Energy Storage Science and Technology,2020,9(1):101-108.
- [17] SARANI I,PAYAN S,PAYAN A,et al. Enhancement of energy storage capability in RT82 phase change material using strips fins and metal-oxide based nanoparticles[J]. Journal of Energy Storage,2020. DOI: 10.1016/j. est. 2020. 102009.
- [18] 朱玉熙,李宏,孟波,等. 弓形结构对套管式相变蓄热器蓄热性能影响的数值模拟[J]. 节能,2020,39(2):119-123.
ZHU Yuxi,LI Hong,MENG Bo,et al. Numerical simulation of the influence of arch section on the performance of shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit[J]. Energy Conservation,2020,39(2):119-123.
- [19] MAHDI J M,NSOFOR E C. Solidification enhancement in a triplex-tube latent heat energy storage system using nanoparticles-metal foam combination[J]. Energy,2017,126:501-512.
- [20] AL-ABIDI A A,MAT S,SOPIANK,et al. Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering,2013,53(1):147-156.