周子翔, 李环, 杨娜,等. 换热器中增强相变材料传热性能的数值模拟研究[J]. 智能计算机与应用,2026,16(6):167-173.
DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.24092902

换热器中增强相变材料传热性能的数值模拟研究

周子翔, 李 环, 杨 娜, 卢佳佳, 王垒曦, 梅贵勇
(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

摘 要: 为提升相变储热器的传热性能,增强换热圆管到相变材料的热传递,本文基于 ANSYS Fluent 软件建立仿真模型,采用焓-多孔介质法对相变储热过程进行数值模拟,设计了一款多通道"蜂窝状"管道布置的相变储热装置。研究结果表明,"蜂窝状"的储热单元结构能够有效增强相变材料的传热速率,从而缩短储热时间,其传热性能提高 85.08%;对"蜂窝状"结构进行加装翅片的优化设计,最优的装置结构其传热性能提高 91.83%。

关键词: 储能; 相变储热; 蜂窝状; 翅片
中图分类号: TK172 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-2163(2026)06-0167-07

Numerical simulation of heat transfer properties of enhanced Phase Change Materials in heat exchangers

ZHOU Zixiang, LI Huan, YANG Na, LU Jiajia, WANG Chengxi, MEI Guiyong
(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: To effectively enhance the heat transfer performance of the phase change thermal storage device and improve the thermal exchange between the heat exchanging cylinder and the Phase Change Material, this paper establishes a simulation model utilizing ANSYS Fluent software and employs an enthalpy-porous medium model to conduct a numerical simulation of the phase change thermal storage process. Specifically, a multi-channel "honeycomb" pipe arrangement for the phase change thermal storage device is designed. The results indicate that the "honeycomb"-shaped heat storage unit structure can effectively increase the heat transfer rate of PCMs, thus shortening the heat storage time, with a heat transfer performance improvement of 85.08%. Additionally, an optimized design with fins is implemented based on the "honeycomb" structure. The optimal device structure shows a heat transfer performance improvement of 91.83%.

Key words: energy storage; phase change thermal storage; honeycomb-like; fin

0 引 言

国家能源局关于印发《2024 年能源工作指导意见》的通知提出持续巩固"电力稳定可靠、油气底线可保、煤炭压舱兜底、新能源高质量跃升"的良好态势。由于不可再生能源的不断枯竭与全球变暖的加剧,迫使从常规能源的利用转向新能源的开发[1]。储能技术能够有效解决新能源消纳难题,是推动能源结构转型的关键技术[2]。储热技术是储能技术的一种,拥有广阔的发展前景,主要包括显热储热、相变储热和热化学储热。其中,热化学储热虽然蓄热密度大,但不安全且蓄热过程不可控,严重影响其推广应用[3]。显热储热是目前应用最广的一种储热方式,然而储热密度小,储能时间短,储能系统过于复杂庞大[4]。与显热储热系统相比,相变储热具有储热密度高、相变过程温度近似恒定等优点,此外还具有良好的重复性和可控性[5-6],得到了广泛的研究。

相变储热装置作为能源系统中的关键核心部件,其储放热特性直接决定了能源系统的最终运行性能[7-8]。相变储热是利用相变材料发生相变时吸热或放热的特性储存或释放能量,也叫潜热储热。

基金项目: 贵州大学"SRT"计划项目(2023SRT095)。
作者简介: 周子翔(2004—),男,本科生。主要研究方向:相变储热数值模拟技术。
通信作者: 李 环(1978—),女,硕士生导师。主要研究方向:多尺度数值模拟与仿真技术。Email:871308476@qq.com。
收稿日期: 2024-09-29

相变材料(Phase change material, PCM)的储热密度大、热稳定性好、应用温度范围广,已经较为广泛地被利用在能源热能的领域。当热能供应充足时,利用储热媒技术对热能进行存储,当供应不足时,储存的能量将得以利用,从而提高热能能源的利用率[9]。但是 PCM 的导热性差是其最不利的特性,这可能限制其在潜热存储系统中的适用性[10]。研究人员提出了一些相变材料的传热强化方法,这些解决方案中一部分提出了使用翅片的思路,也有一些建议将 PCM 与具有更大导热性的颗粒、如碳纤维和金属珠随机混合[11-14]。在这些替代传热增强方法中,使用翅片增强传热被证明是最可行的选择,因为这类设计更传统,更容易生产,成本更便宜,效率更高[15-16]。在一些相关研究中使用了具有各种形状和尺寸的 PCM 热交换器系统,并得出结论:对于特定应用,热交换增强的功效还受到其他因素的影响,例如设计配置、传热流体和 PCM 类型[17-19]。计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)建模(数值求解 Navier-Stokes 方程的质量、能量和动量偏微分方程)是预测 PCM 熔化/凝固行为的有效模拟技术,可用于现有设计和评估[20]。焓-多孔介质法可以在能量方程中求出焓值,总的焓值包括显热分量和潜热分量,其中潜热焓表示 PCM 在液相中的潜热的百分比,这一比例通常被称为 PCM 的液相率。本文以相变储热技术回收利用低温余热为背景,同步开展了相变材料熔化过程的相变传热特性和结构参数对传热性能的影响规律,对所提出的"蜂窝状"管道布置结构以及添加翅片优化后的装置结构进行数值模拟。

1 数学模型

本文对圆管 PCM 换热器进行了二维简化。为了降低 PCM 熔化所需的时间,在保证换热面积相同的情况下将单管 PCM 换热器改为多管 PCM 换热器。此后,在其周围加入翅片进一步改善传热性能。研究了在圆柱壳内填充镓作为 PCM 的 6 种 PCM 换热器,包括无翅单圆管(case1)、无翅 4 圆管(case4)、无翅 7 圆管(case7)、无翅 9 圆管(case9)、直翅 9 圆管(case9-直翅)、双 T 型翅片 9 圆管(case9-TT)。研究还指出,镓具有较高的储热能力和良好的熔化温度,还具有无腐蚀性和在大量热循环中性能稳定的优点(热物理性质见表 1),因此选用镓作为 PCM 进行仿真研究[21]。

构建几何模型如图 1 所示,通过 mesh 进行网格划分如图 2 所示,用 Flunet 软件建立焓-多孔介质模型用于分析瞬态条件下 PCM 的熔化现象。

表 1 纯镓的热物理性质

Table 1 Thermophysical properties of pure gallium

序号	热物理性质	参数
1	密度 (ρ)/($kg \cdot m^{-3}$)	6 093
2	热膨胀系数 (β)/K^{-1}	0.000 12
3	导热系数 (K)/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	32
4	熔化焓(LHF)/($J \cdot kg^{-1}$)	80 160
5	动态粘度(μ)/($N \cdot s \cdot m^{-2}$)	0.001 81
6	比热(CP)/($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	381.5
7	熔化温度 (T)/℃	29.8

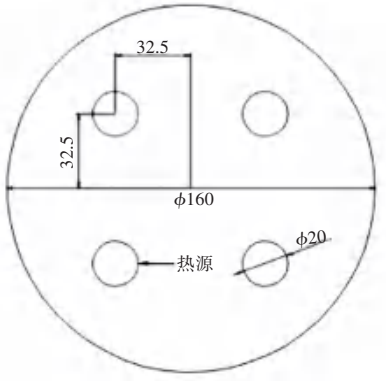


图 1 几何建模

Fig. 1 Geometrical modeling



图 2 非结构化三角形网格

Fig. 2 Unstructured triangular mesh grid

1.1 边界条件

(1)本研究中所有几何形状中的换热管都保持在恒定温度条件下。

(2)外壳的外壁保持绝热。

(3)内管假定为静态,管外壁 PCM 运动假定为零,表示管外壁不打滑。

(4)PCM 初始温度保持在 27 ℃。

1.2 假设

在研究二维非定常模型时,PCM 换热器中的能量传递现象包括以下假设:

(1)除密度随温度变化外,镓的热物理特性被认为是恒定的。

(2)该流体被认为是不可压缩的。

(3)在浮力驱动区域,利用 Boussinesq 模拟液态相变材料的自然对流效应。

(4)镓在熔融区以二维层流运动流动。

1.3　数学公式

连续性方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \tag{1}$$

其中，ρ 表示 PCM 密度，V 表示二维速度。

动量方程是用体积力作为浮力，以二维矢量形式表示动量表达式。可以表示为：

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}\vec{V}) = -\vec{\nabla} P + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \vec{\beta} \vec{g} \Delta T + S \tag{2}$$

其中，P 表示静压；ΔT 表示 PCM 温差；β 表示体积膨胀系数；g 表示重力加速度；τ 表示粘性应力张量。

由于糊状区域的孔隙度降低，因此以 S 代表动量源项。在焓-孔隙度技术中，糊状区(部分固体化部分)被认为是多孔介质。每个单元的孔隙率由该单元中的液体比例确定。由于完全固体区域的孔隙度为零，因此所有这些位置的速度均为零。研究用到的数学公式为：

$$S = \frac{(1 - x)^2}{(x^3 + \varepsilon)} C_{\text{mush}} (\vec{V} - \vec{V}_P) \tag{3}$$

其中，ε 表示一个微小的值(0.001)，以防止除以零；C_{mush} 表示 α 糊状区常数；V_P 表示由于将固化材料拉出该区域而产生的固体速度(也称为拉速)。

能量方程为：

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \vec{V}) = \nabla \cdot (k \nabla T) \tag{4}$$

其中，k 表示流体的导热率；h 表示每单位质量的流体焓，定义为：

$$\begin{aligned} h &= h_S + h_L \\ h_S &= h_{\text{ref}} + \int_{T_r}^{T} C_P \mathrm{d}T \end{aligned} \tag{5}$$

其中，h_S 表示显热焓；h_{ref} 表示参考温度 T_{ref} 下的参考热焓；C_P 表示比热。进一步推得：

$$h_L = x \times \text{LH}_F \tag{6}$$

其中，h_L 表示在固化和熔化期间变化的潜热，并且可以在零(对于固体)和 LH_F(对于液体)之间变化，并且 x 是液体的分数。就温度而言，液体分数可以表示为：

$$x = \begin{cases} 0, & \text{if } T < T_{\text{Solid}} \\ \dfrac{T - T_{\text{Solid}}}{T_{\text{Liquid}} - T_{\text{Solid}}}, & \text{if } T_{\text{Solid}} < T < T_{\text{Liquid}} \\ 1, & \text{if } T > T_{\text{Liquid}} \end{cases} \tag{7}$$

2　数值公式与网格独立性研究

2.1　数值公式

在计算温度场和焓场的基础上，采用焓-孔隙率法确定相变界面。采用 ANSYS Fluent 软件的“凝固-熔化”模型，结合 PISO 压力-速度耦合方法，对换热器中相变过程的控制方程进行求解。管壁受到无滑移条件的影响，这意味着 PCM 在此处的速度为零。此外，动量和能量方程采用 QUICK 差分法求解，压力修正方程采用 PRESTO 格式求解。压力、密度、动量、能量和液体分数都具有分别为 0.3、1.0、0.7、1.0 和 0.9 的欠松弛值因子。连续性、动量和能量方程的收敛要求分别设为 10^{-1}、10^{-3} 和 10^{-6}。

关于网格无关性和时间步长无关性验证，对于瞬态数值模拟，首先需要确定计算所用网格数量以及时间步长与计算获得的结果无关联性，也就是不断地改变网格的疏密或时间步长的大小，观察计算结果的变化，若其变化幅度在允许的范围之内，即完成网格无关性和时间步长无关性验证。

网格无关性验证如图 3 所示。圆形管(Case4)且没有翅片的 PCM 换热器几何形状的元件数量从 42 318 增加到 65 289，就 PCM 在热交换器中液体比例的增长趋势而言，没有出现显著变化，最终选择单元数为 42 318 的网格密度进行数值模拟。时间步长无关性验证如图 4 所示。对于所考虑的时间步长 0.5 s、1.0 s 和 2.0 s，结果几乎没有变化，因此在本研究中时间步长最终选择为 1 s。

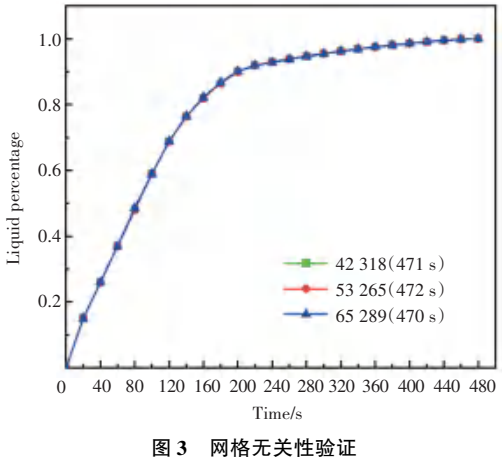


图 3　网格无关性验证

Fig. 3　Verification of grid independence

2.2　验证结果

Rana 等学者[21]通过数值模拟研究以镓作为 PCM 填充在圆柱形腔体中的熔化过程，该圆柱形腔体分别具有 4 个圆管和 4 个椭圆管，以施加在热源

上的 60 ℃的固定温度作为热源;在本研究中通过复现其结果来确保研究的准确性。PCM 的熔化时间和 PCM 的液体部分随时间的变化趋势是用于评估研究的有效性的 2 个措施。验证研究的结果如图 5 所示。本研究中复现结果的熔化时间分别为 466 s 和 474 s,与 Rana 等学者[21]的结果仅表现出 1.71% 的差异,证明了方法的可行性。

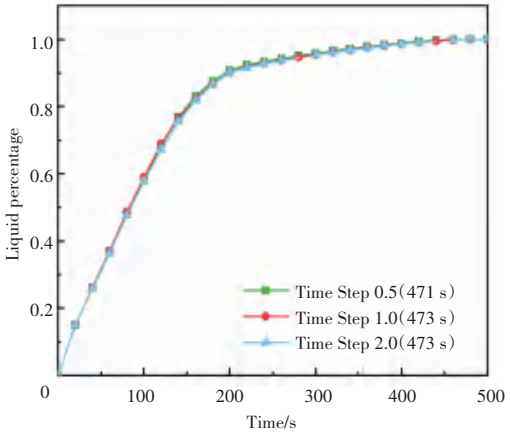
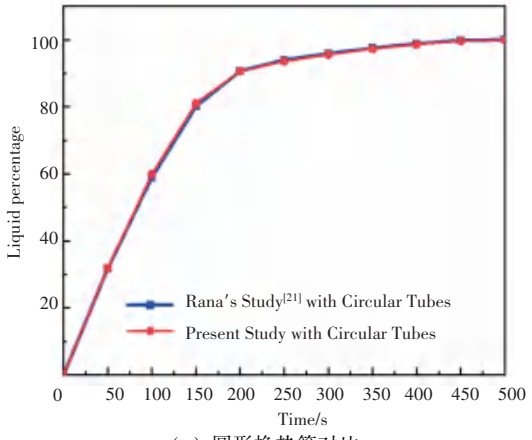
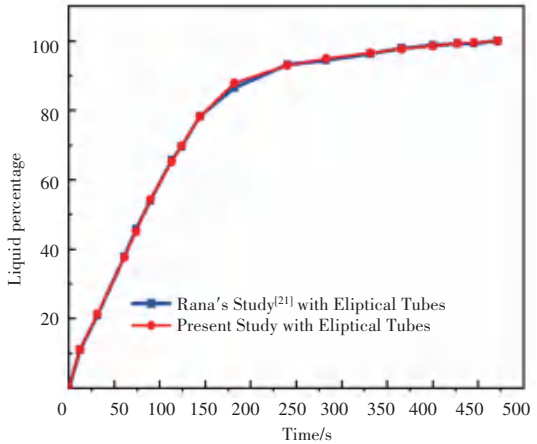


图 4 时间步长无关性验证

Fig 4 Verification of time step independence



(a) 圆形换热管对比



(b) 椭圆形换热管对比

图 5 与文献[21]的对比验证

Fig. 5 Verification with Ref. [21]

3 分析与讨论

通过比较相变材料在不同换热器中的熔化行为来分析所设计“蜂窝状”换热结构以及添加翅片对相变材料融化速率、温度特性和熔化时间的影响。

图 6 显示出了在圆形管的 PCM 热交换器的配置中 50 s 的时间下不同几何形状液相率云图比较:对于无翅单圆管(case1)几何形状的圆管,液体百分比为 13.67%,而对于无翅 4 圆管(case4)几何形状的圆管,PCM 的液体百分比为 31.35%,无翅 7 圆管(case7)相变材料的液相率为 45.69%,无翅 9 圆管(case9)相变材料的液相率为 52.43%,直翅 9 圆管(case9-直翅)的相变材料液相率为 63.21%,双 T 型 9 圆管(case9-TT)的相变材料液相率为 84.69%。



图 6 60 ℃下 100 s 后所有几何形状的液相率云图

Fig. 6 Liquid phase ratio cloud map of all geometric shapes after 100 s at 60 ℃

图 7 显示出了在圆形管的 PCM 热交换器的配置中 50 s 的时间下不同几何形状温度云图的比较:对于无翅单圆管(case1)几何形状的圆管,PCM 平均温度为 29.87 ℃,而对于无翅 4 圆管(case4)几何形状的圆管,PCM 平均温度为 32.51 ℃,无翅 7 圆管(case7)PCM 平均温度为 33.73 ℃,无翅 9 圆管(case9)相变材料的平均温度为 35.29 ℃,直翅 9 圆管(case9-直翅)的相变材料平均温度为 37.56 ℃,双 T 型 9 圆管(case9-TT)的相变材料平均温度为 44.66 ℃。

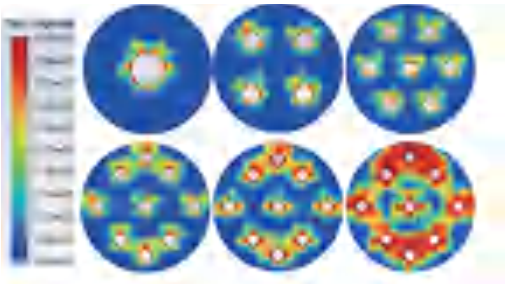
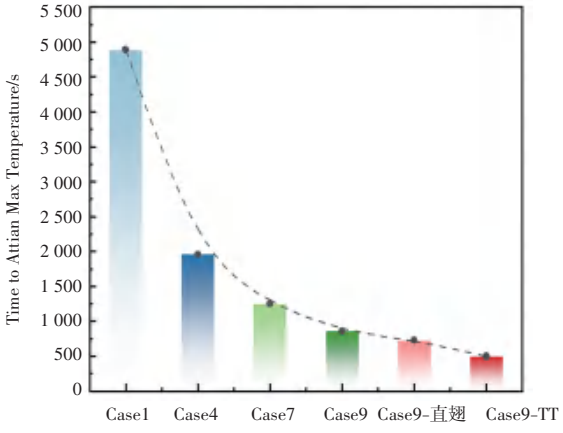


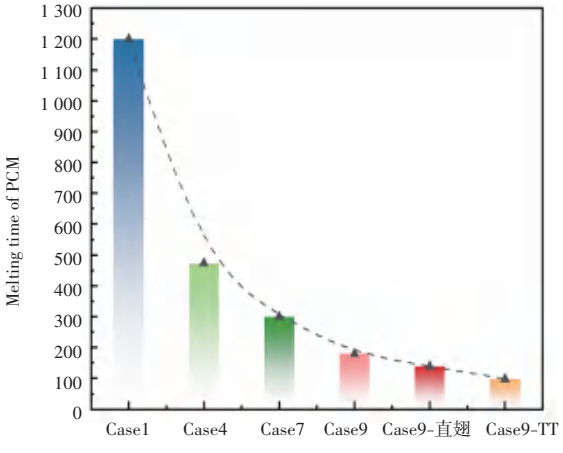
图 7 60℃下 100 s 后所有几何形状的温度云图

Fig. 7 Temperature cloud map of all geometric shapes after 100 s at 60 ℃

图 8 比较了所有配置中 PCM 60 ℃下完全熔化以及达到最高温度(管道外壁的应用温度)所需的时间：在“Case1”结构配置中，PCM 完全熔化的时间为 1 199 s，达到最高温度 60 ℃所需时间是 4 887 s；在“Case4”结构配置中，PCM 完全熔化的时间为 473 s，达到最高温度 60 ℃所需时间是 1 957 s；在“Case7”结构配置中，PCM 完全熔化的时间为 299 s，达到最高温度 60 ℃所需的时间是 1 250 s；在“Case9”结构配置中，PCM 完全熔化的时间为 179 s，达到最高温度 60 ℃所需时间是 858 s；在“Case9-直翅”结构配置中，PCM 完全熔化的时间为 139 s，达到最高温度 60 ℃所需时间是 728 s；在“Case9-TT”结构配置中，PCM 完全熔化的时间为 98 s，达到最高温度 60 ℃所需时间是 497 s。



(a) 达到最高温度所需时间

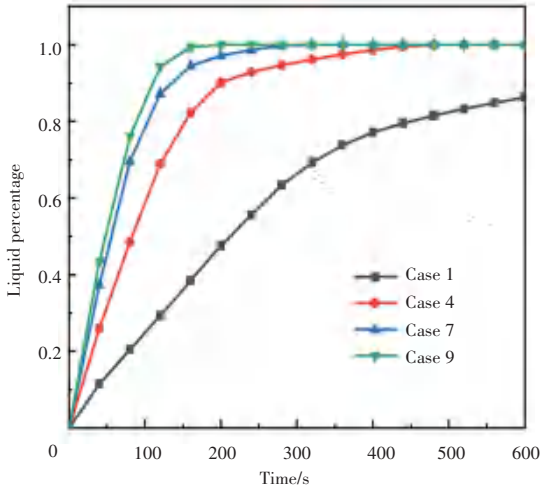


(b) 熔化时间

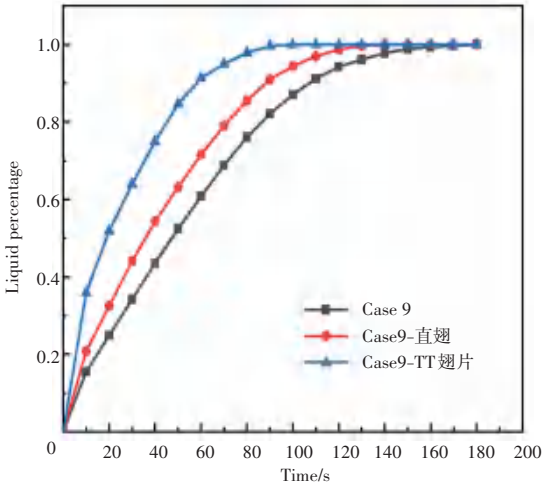
图 8　60 ℃下所有几何形状熔化和达到最高温度的时间

Fig. 8　The time for all geometric shapes to melt and reach their maximum temperature at 60 ℃

图 9 显示出了在 60 ℃下所有结构配置中 PCM 液相率随时间的变化曲线。在初始阶段(40 s)的熔融速率非常高：在“Case1”的构造中为 11%的液体分数；在“Case4”的构造中为 26%的液体分数；在“Case7”的构造中为 37%的液体分数；在“Case9”的构造中为 43%的液体分数；在“Case9-直翅”的构造中为 54%的液体分数；在“Case9-TT”的构造中为 75%的液体分数。在所有配置中当液相率达到 80%左右时，曲线的斜率略有变化，随着 PCM 和管表面之间的温差减小，熔化速率减慢，需要总熔化时间的一半来完成剩余的熔化过程。在所有 6 种情况下，“Case-TT”的结构配置完全熔化所需时间最短。



(a) “蜂窝状”组液相率



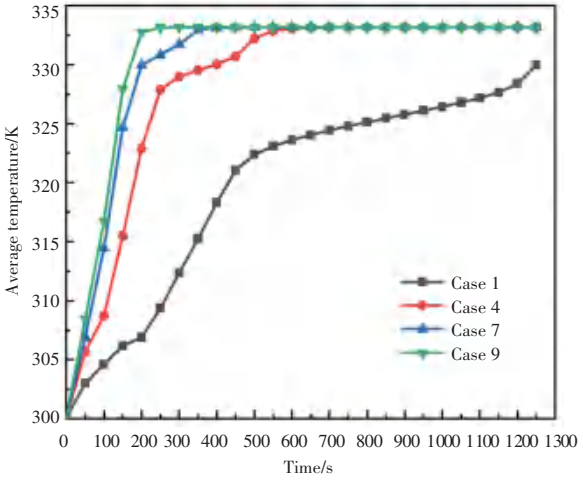
(b) 翅片组液相率

图 9　60 ℃下所研究几何结构的液相率

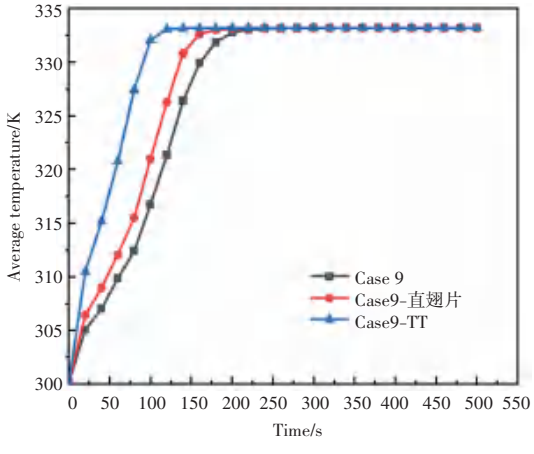
Fig. 9　Liquid phase fraction of the studied geometric structures at 60 ℃

图 10 表示热交换器内 PCM 的温度变化。在 PCM 开始熔化时，PCM 与管表面之间的温差高，因此发生更多的热传递，导致更高的温升。随着 PCM 温度的升高，传热速率降低，温度升高变得非常缓慢。曲线图显示 Case9-TT 配置的 PCM 花费最少的

时间来达到所施加的温度。



(a)“蜂窝状”组平均温度



(b) 翅片组平均温度

图 10 60 ℃下所研究几何结构的温度

Fig. 10 Temperature of the studied geometric structure at 60 ℃

4 结束语

本研究针对一种以镓为相变材料的“蜂窝状”圆管相变材料换热器进行数值模拟研究。在最优的“蜂窝状”换热器圆管上分别添加了直翅片和双 T 型翅片的几何形状进行了比较,以进一步增强从管到 PCM 的热传递并优化管的几何形状。本研究取得了以下结果:

(1)在没有添加翅片几何形状的圆形管中,对比单管的换热结构,“蜂窝状”换热装置在 60 ℃下 PCM 熔化时间分别缩短了 60.58%、75.08%、85.08%;在相同流动时间下,“蜂窝状”管中相变材料的平均温度明显高于单管,在 220 s 时,单管、4 个管、7 个管和 9 个管的温度依次为 307.37 ℃、325.63 ℃、330.37 ℃和 333.00 ℃。基于数值模拟的结果得出结论:Case9 圆管的 PCM 换热器换热性能最佳。

(2)在 Case9 圆管的基础上,提出了添加翅片的优化措施。分别添加直翅片(Case9-直翅)和双 T 型翅片(Case9-TT),对其数值模拟结果进行分析。结果表明:直翅片完全融化时间缩短了 22.346%、PCM 液相率最高是 Case1 换热结构的 1.29 倍;双 T 型翅片完全融化时间缩短了 45.251%、PCM 液相率最高、是 Case1 换热结构的 1.83 倍。在相同流动时间下,翅片优化后 PCM 的平均温度显著提高,熔化时间减少,储热效率提高;但是由于添加翅片的缘故导致在同样的条件下 PCM 的体积减少,会导致储能元件的总储热量减少。

参考文献

[1] 程子杰, 陈观生, 刘良德, 等. 铝硅合金相变储热装置保温结构实验研究[J]. 广东工业大学学报, 2023, 40(3): 46-51.
[2] 杨琳, 高宏. 国外新型储能产业政策发展动态及对我国的启示[J]. 中国工业和信息化, 2022 (8): 18-22.
[3] 姜竹, 邹博杨, 丛琳, 等. 储热技术研究进展与展望[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(9): 2746-2771.
[4] 李拴魁, 林原, 潘锋. 热能存储及转化技术进展与展望[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1551-1562.
[5] TAO Y B, HE Yaling. A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 93: 245-259.
[6] ZHANG Xuan, ZHANG Chengbin, CHENG Yongping. Role of latent heat storage in thermal performance of an axially grooved heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 198: 123415.
[7] 鲁博辉. 相变储热装置储放热特性及强化换热研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
[8] 王梓熙. 管壳式相变储热单元强化传热及优化设计研究[D]. 北京:中国石油大学(北京), 2022.
[9] 陈晓宇. 相变储热单元翅片结构优化及传热特性研究[D]. 济南:山东大学, 2023.
[10] QURESHI Z A, HAFIZ M A, SHAHAB K. Recent advances on thermal conductivity enhancement of phase change materials for energy storage system: A review[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127: 838-856.
[11] SALEH A. Development and experimental validation of a CFD model for PCM in a vertical triplex tube heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 116: 344-354.
[12] RANA S Z M, RAJESH K. CFD approach for the enhancement of thermal energy storage in phase change material charged heat exchanger[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 33: 101921.
[13] YOUSSEF W Y T G, TASSOU S A. CFD modelling development and experimental validation of a phase change material (PCM) heat exchanger with spiral-wired tubes[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 157: 498-510.
[14] MAHDI J M, EMMANUEL C N. Multiple-segment metal foam application in the shell-and-tube PCM thermal energy storage

system[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 20: 529-541.
[15] BOUHAL T T K, JAMIL A. CFD thermal energy storage enhancement of PCM filling a cylindrical cavity equipped with submerged heating sources[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 18: 360-370.
[16] RANA S M Z, RAJESH K. CFD simulation for heat transfer enhancement in phase change materials[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 10915-10921.
[17] RANA S M Z, RAJESH K. CFD analysis for heat transfer comparison in circular, rectangular and elliptical tube heat exchangers filled with PCM[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 56: 637-644.
[18] CAO Yan. Observation the melting process of the phase change material inside a half-cylindrical with thermal non-equilibrium porous media: CFD simulation[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 28: 101496.
[19] MAHDI J M. Intensifying the thermal response of PCM via fin-assisted foam strips in the shell-and-tube heat storage system[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 45: 103733.
[20] ZAYED M E. Applications of cascaded phase change materials in solar water collector storage tanks: A review[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 199: 24-49.
[21] RANA S M Z, RAJESH K. Enhancement of thermal energy storage in a phase change material heat exchanger having elliptical and circular tubes with & without fins[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 56: 105856.