

含强化肋的 PCM 相变储热与传热特性数值研究

张永春¹, 董文利¹, 孙 涛¹, 梁国安¹, 尹 迪², 周小明²

(1.江苏省特种设备安全监督检验研究院, 江苏 南京 210036)

(2.河海大学机电工程学院, 江苏 南京 210024)

[摘要] 为了有效提升 PCM 相变储热器的性能, 本文采用多种金属翅片对相变过程进行强化, 并采用焓-多孔介质模型对相变储热过程进行了数值模拟, 分析了不同金属材料 and 不同基体孔隙率对相变储热及传热特性的影响。研究表明, 采用金属泡沫强化翅片能够增强导热和对流效应, 优化流场对流涡分布, 储热器相变储热时间大大缩短, 耗时仅为无翅片工况的 16.8%; 采用铜金属泡沫翅片的储能效率略优于铝金属泡沫翅片, 储热时间缩短 3.47%; 强化翅片孔隙率对储热性能影响较弱, 孔隙率为 0.4 时最优, 孔隙率为 0.6 时次之, 孔隙率为 0.8 时最差。

[关键词] 相变储能, 金属泡沫, 翅片, 孔隙率, 石蜡

[中图分类号] TK02 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2024)02-0008-09

Numerical Study on Heat Storage and Heat Transfer Characteristics of PCM Phase Transition with Reinforced Ribs

Zhang Yongchun¹, Dong Wenli¹, Sun Tao¹, Liang Guoan¹, Yin Di², Zhou Xiaoming²

(1.Special Equipment Safety Supervision and Inspection Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

(2.College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to effectively improve the performance of PCM phase change heat reservoir, a variety of metal fins are used to strengthen the phase change process, and the enthalpy-porous medium model is used to simulate the phase change heat storage process. The effects of different metal materials and different matrix porosity on the characteristics of phase change heat storage and heat transfer are analyzed. The results show that the heat conduction and convective effect can be enhanced by the metal foam reinforced fin, and the convective vortex distribution in the flow field can be optimized. The heat storage time of the heat reservoir phase transformation is greatly shortened, which is only 16.8% of that in the condition without fins. The energy storage efficiency of copper metal foam fin is better than that of aluminum metal foam fin, and the heat storage time is shortened by 3.47%. The porosity of reinforced fin has a weak influence on the heat storage performance. When the porosity is 0.4, it is the best, followed by 0.6, and the worst when 0.8.

Key words: phase change energy storage, metal foam, fins, porosity, paraffin wax

有机材料石蜡具有无毒性、化学性质稳定、无过冷、来源广泛、价格低廉等优点, 是优秀的相变材料 (phase change materials, PCM), 适用于大部分的相变储能领域。相变储热技术可有效解决可再生能源分布不广泛、能量释放不连续的问题, 在太阳能光热发电系统中加入储热单元, 可有效缓解太阳能时间空间分布不均带来的影响, 实现电力的“移峰平谷”平稳输出^[1]。冷藏系统中加入相变储能装置, 可保证平稳制冷, 节约用电^[2]。然而, 相变材料也存在显著的缺点, 如材料导热系数较低, 导致蓄热过程缓慢。储能材料的导热系数低是阻碍此技术发展的主要原因, 前人对于相变储热技术的强化做了大量研究。在强化传热中, 添加翅片是应用最广泛的方法。王君雷等^[3]将翅片设置为螺旋翅片, 使该储热单元的熔化时间缩短了 12.21%, 通过改进螺旋翅片参数达到扩大接触面积的效果, 可使换热性能优化。崔洁等^[4]建立圆柱型翅片, 分析翅片参数的影响, 结果指出翅片间距为主要影响因素, 对流换热效果先强后弱。朱子钦等^[5]在球形容器中加环形翅片, 进一步验证了自然对流对储热速率的影响, 翅片高度越高, 储热效率越高。范宗良

收稿日期: 2023-06-07.

基金项目: 江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2021750)、江苏省特检院科技计划项目(KJ(Y)2023011)。

通讯作者: 张永春, 博士, 高级工程师, 研究方向: 锅炉节能减排技术, 太阳能光热利用与储能技术。E-mail: zh_yongchun@163.com

等^[6]改进了 Y 型纵翅片相变蓄热器,与光管相比融化时间减少了 44%。

另一种有效的强化方法是填充金属泡沫,喻家帮等^[7]将通孔金属泡沫和环形翅片结合,使蓄热器导热能力显著提升。顾思忠^[8]对多孔金属泡沫等截面直肋片进行研究,从场协同理论的角度,阐述了多孔结构孔隙率对强化换热的影响原理,边界层的不断破坏使得热边界层产生的热阻作用减小,同时金属泡沫的高紧凑性为微小元件换热领域提供了重要的参考依据。还可通过开发新的复合材料作为储能工质,直接提高储能材料的导热系数,如鄂可谊^[9]设计的铝-二元硝酸盐复合材料,导热系数高达 $14.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。尽管以上研究者对 PCM 相变储热器的强化进行了比较充分的研究,但相变储热器内部强化的传热传质过程及内在机理仍没有得到有效的揭示,有必要进一步开展全面的研究及分析。

因此,本文基于前人研究,提出了采用金属泡沫翅片作为强化翅片进行相变及传热强化,以 RT58 石蜡为储能材料分析其强化机理,系统分析了采用不同金属材料 and 不同多孔率翅片对储热特性的影响,为提高相变储热器储热性能提供理论和技术指导。

1 物理数学模型

图 1 所示为三维储能元件物理模型,整个计算区域初始温度为 45°C ,内壁面温度为 100°C ,外壁面为绝热壁面。考虑其完全对称的物理结构,将相变传热过程中的工况简化为图 2 所示的相变冷却模型,并做下列假设:(1)假设金属泡沫孔隙中的静止流体材料为液态 RT58,忽略其在初始时的相变过程;(2)假设 RT58 石蜡为单一材料,不考虑其在工作域分布不均的情况,液化后为不可压缩的牛顿流体;(3)液态材料的流动状态为层流,考虑重力和体积力的影响;(4)假设石蜡熔化后为各向同性扩散。

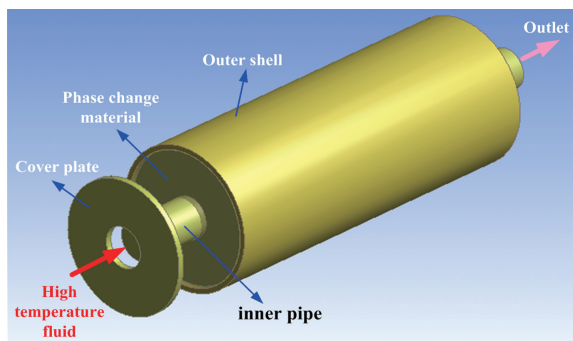


图 1 相变储热器物理模型

Fig. 1 Physical model of phase change heat reservoir

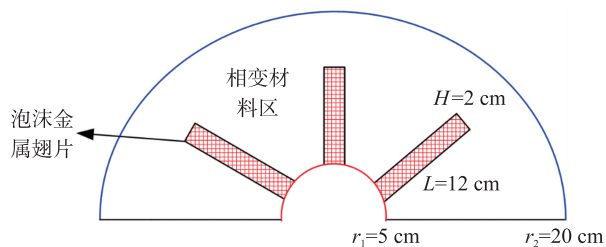


图 2 相变储热器二维简化模型

Fig. 2 Two-dimensional simplified model of phase change heat reservoir

采用焓-孔模型^[10-14]对相变蓄热单元性能进行数值模拟研究,涉及到相变传热及多孔介质传热过程,相变过程中的浮力对流采用 Boussinesq 假设模型进行模拟,并对相变过程作以下假设:(1)相变材料的液相流动是不可压缩的和层流流动;(2)PCM 和泡沫金属的热性能是恒定的和各向同性的;(3)液相 PCM 的粘度保持恒定。因此,含有强化金属翅片的 PCM 相变过程控制方程如下:

连续性方程:

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

动量方程:

$$\begin{cases} \frac{\rho_f}{\delta} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\rho_l}{\delta^2} \nabla \cdot \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_f}{\delta} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + S_x \\ \frac{\rho_f}{\delta} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\rho_l}{\delta^2} \nabla \cdot \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu_f}{\delta} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + S_y \end{cases}, \quad (2)$$

其中:

$$S_x = -\frac{A_m(1-\beta)^2}{\beta^3 + \omega} u - \frac{\mu_f}{K} u - \frac{\rho_f C_F}{\sqrt{K}} |\vec{V}| u, \quad (3)$$

$$S_y = -\frac{A_m(1-\beta)^2}{\beta^3 + \omega} v - \frac{\mu_f}{K} v - \frac{\rho_f C_F}{\sqrt{K}} |\vec{V}| v + \gamma \rho_f g (T_f - T_0), \quad (4)$$

$$\begin{cases} \beta = 0, & T_f < T_{m1} \\ \beta = 1, & T_f > T_{m2} \\ \beta = \frac{T_f - T_{m1}}{T_{m2} - T_{m1}}, & T_{m1} < T_f < T_{m2} \end{cases}, \quad (5)$$

$$K = 0.000\ 73(1-\varepsilon)^{-0.224} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{-1.11} d_p^2, \quad (6)$$

$$\frac{d_f}{d_p} = 1.18 \sqrt{\frac{1-\varepsilon}{3\pi}}. \quad (7)$$

能量方程:

固相方程:

$$(1-\varepsilon)\rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_{se} \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) + h_{fs} \alpha_{fs} (T_f - T_s). \quad (8)$$

相变材料方程:

$$\varepsilon \rho_f C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \varepsilon \rho_f C_{pf} \left(u \frac{\partial T_f}{\partial x} + v \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) = (k_{fe} + k_{fd}) \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} \right) + h_{fs} \alpha_{fs} (T_s - T_f) - \varepsilon \rho_f L \frac{\partial \beta}{\partial t}. \quad (9)$$

其中, ρ_f 为相变材料密度, ρ_s 为翅片金属密度; C_{pf} 为相变材料比热, C_{ps} 为翅片金属比热; L 是相变潜热; μ_f 是相变材料动力粘度; ε 是泡沫金属孔隙率; T_f 和 T_s 分别是相变材料和金属材料温度; k_{se} 和 k_{fe} 分别是金属翅片有效热导率和相变材料热导率; k_{fd} 是热分散率; α_{fs} 是界面面积; h_{fs} 是界面传热系数, 根据建模时假设热性参数恒定, 此处传热系数在 PCM 发生相变前后保持不变; p 为压力; S_x 和 S_y 是源项; A_m 是糊状区常数且为 105; ω 是恒定值且为 0.001; β 是相变材料的液相系数, δ 为液相分数, 且 $\delta = \varepsilon \beta$; K 是渗透率; C_F 是 Forchheimer 常数; d_p 是孔径; γ 是热膨胀系数.

边界条件:

内壁面为恒温高温壁面且 $T = 375.15\text{ K}$, 外壁面为绝热壁面, 各壁面及多孔介质壁面速度满足无滑移条件.

本文数值计算中的相变材料为 RT58, 其热物性参数如表 1 所示:

表 1 相变材料 RT58 热物性参数

Table 1 Thermal properties of phase change material RT58

物性	数值	物性	数值	物性	数值	物性	数值
熔化温度	50~60 °C	液相密度	775 kg/m ³	比热容	900 J/(kg·K)	聚变潜热	230 kJ/kg
固相密度	850 kg/m ³	运动粘度	3.165×10 ⁻⁵ ~0/s	导热系数	0.2 W/(m·K)	热膨胀系数	0.000 764 K ⁻¹

2 计算方法

含强化翅片的 PCM 相变储热过程流动及换热控制方程采用有限元软件进行求解, 其中扩散和对流项采用向后差分公式法离散; 相对容差设定为 0.005, 减小误差的同时增大收敛速度; 方程组的迭代求解采用全耦合求解器, 减小迭代次数并提高收敛性; 当迭代求解过程中速度、温度和压力的相对变化率小于 10^{-5} 时, 认为计算过程达到收敛要求; 计算方法的正确性已经得到验证. 在网格划分方面, 为了精确求解流场和温度场, 对内、外壁面处进行了局部细化, 网格划分如图 3 所示. 研究中分别采用四组网格 15 110、25 431、46 870 和 89 635 进行了网格收敛性测试, 结果表明, 网格数为 46 870 能够满足要求, 如表 2 所示.

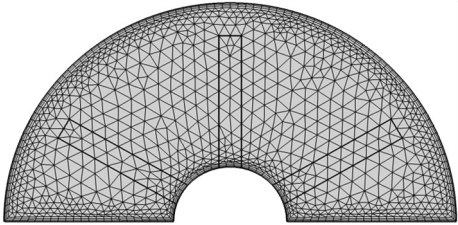


图 3 网格划分

Fig. 3 Division of grid

表 2 不同网格数下 PCM 相变过程最大流速

Table 2 Maximum flow rate of PCM phase transition process under different mesh numbers

网格数量	15 110	25 431	46 870	89 653
速度/(m/s)	0.135	0.138	0.1385	0.1387

3 计算结果

3.1 金属泡沫翅片强化相变储热传热特性分析

为分析金属泡沫翅片储能元件的传热特性,对无翅片储能元件与金属泡沫翅片储能元件的储能特性进行对比,验证翅片对相变传热强化效果,采用铜作为基体材料,翅片孔隙率为 0.8. 从图 4 可以清晰看到,0.1 h 时无翅片情况的相变仅仅在内壁表面附近产生了一层(图 4(a)),采用金属泡沫铜翅片的整个翅片区域在 0.1 h 时几乎完全发生相变,在翅片之间的受内壁影响为主的储能材料区域的液化程度也比无翅片的情况要高(图 4(b));18.72 h 时无翅片的工况下整体相变程度不到一半(图 4(c)),而存在翅片的工况下已经发生了完全相变(图 4(d)). 根据模拟结果,在内壁恒定 373.15 K 的情况下熔化石蜡,无翅片工况需要 111.56 h 才能完全相变,而金属泡沫翅片工况完全熔化时间仅为前者的 16.8%.

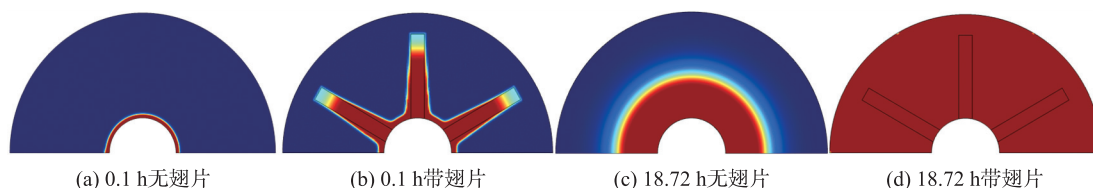


图 4 有无翅片相变过程对比图

Fig. 4 Comparison chart of phase transition process with or without fins

针对带有泡沫金属翅片的工况进行分析,研究金属泡沫翅片储能元件的传热特性. 图 5 为 PCM 相变过程相态分布云图. 从图 5(a)、(b)和(c)可以看出,整个相变过程首先从翅片中的石蜡开始,到 0.1 h 为止整个区域都是以翅片内的相变为主,翅片中完全相变的部分逐渐由翅根向储能材料区域扩散,三根翅片同步进行,每一部分都呈现高等腰梯形状. 这是由于翅片为多孔结构,在金属铜的固体基体间充满储能材料,增大了基体与相变材料的接触面积,同时由于多孔结构里金属骨架具有较高导热率,从而增强了换热. 1 h 后三根翅片均匀向储能材料区传热,如图 5(d)所示;10 h 后翅片顶端与外壁面之间完成全部相变,相变材料区域中固-固液混合区域被液态域独立分隔成好几个小域,传热仍受翅片影响较大,呈现类似于三角形,如图 5(e)所示;直到 18.72 h 完成整个相变过程,如图 5(f)所示.

从图 6 所示的等温线图中可以清晰地看出整个热量传递的趋势. 温度先沿着翅片传导,并受表面的不均匀孔隙影响,在靠近翅片表面的储能材料区出现较为混乱的局部等温线,并同翅片中的低温等温线一同向翅片顶端移动;中央垂直翅片处的工质受重力作用更为明显,这使得其表面流动较为复杂且不均匀,

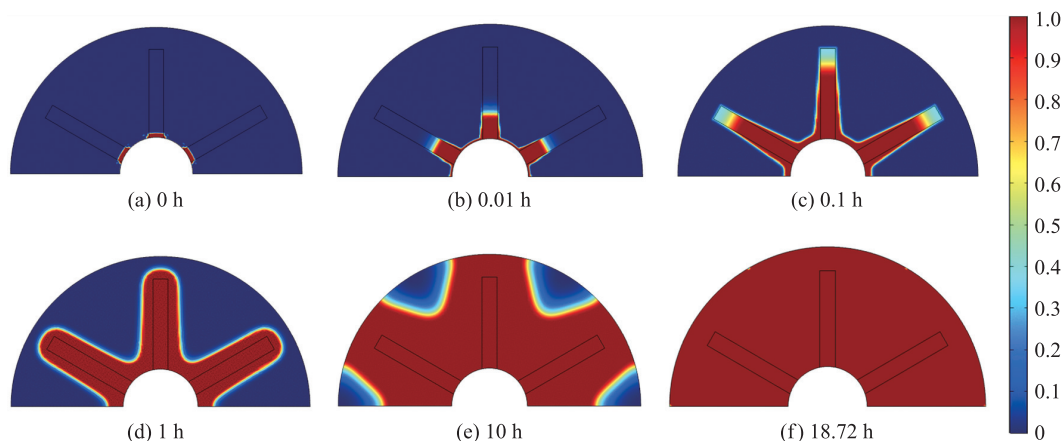


图 5 PCM 相变过程相态分布云图

Fig. 5 Cloud diagram of phase distribution during PCM phase transition

使得在中央垂直翅片表面上的不均匀等温线更明显,两侧倾斜翅片表面的等温线相比之下更加均匀,这样的趋势直到翅片处于统一温度后才消失;1 h 后等温线均匀向储能区域扩散,直到整个区域完全相变.

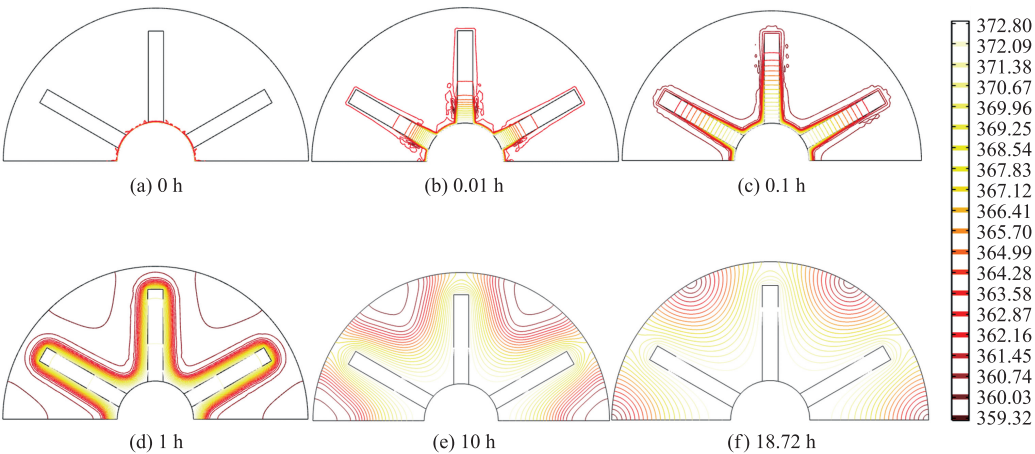


图 6 PCM 相变过程等温线图

Fig. 6 Isotherm diagram of PCM phase transition

整个区域内多孔结构翅片对流动特性都有较大影响,整合流线有较大变化的几个时间点如图 7 所示. 0.01 h 时流线分布还较为均匀,开始相变后翅片中的流线先发生变化;随后在中间翅片两表面形成了较大的漩涡,旋转中心从翅片正中逐渐向翅片顶端移动,如图 7(b) 所示;此后,中心翅片附近不再有漩涡,转而整个区域的漩涡向两侧翅片处转移,并在两个底角处产生新漩涡,如图 7(c) 所示. 随时间推移翅片附近的漩涡逐渐长大,此时中间翅片两侧重新产生漩涡,如图 7(d) 所示;从图 7(e) 可见,9 h 后两侧翅片各自的三个漩涡成长得较为规则,旋转中心按翅顶、翅中、翅根排列,同时也在中间翅片顶端产生两个新的小漩涡;图 7(f) 显示顶部小漩涡向两侧翅片中心漩涡融合的趋势,两侧翅片根部的小漩涡向对应翅片顶部漩涡融合. 到完全相变的 18.72 h,中间翅片附近的漩涡流线最密,如图 7(g) 所示;图 7(h) 显示 19 h 后整个流动区域情况逐渐变简,中间翅片顶端新产生的漩涡沿着外壁面向两侧下部的大漩涡融合,各角落的小漩涡也逐渐消失融入附近的大漩涡中,两侧翅片根部和中心虽然仍有独立的漩涡但都很小,对整体的流动趋势影响较小.

图 8 所示为内部气体速度云图. 从图 8(a) 看出,虽然三个翅片几乎同时相变,但中间翅片部分的速度是最快的;0.5 h 后中间翅片大部分区域都已处于较高流速,而两侧翅片的速度仍然未达到中间翅片的速度,如

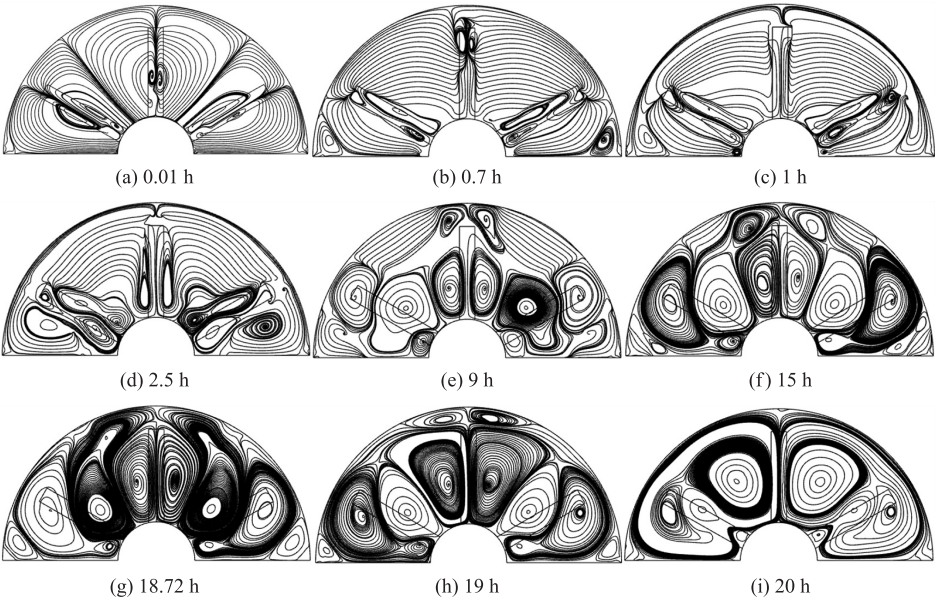


图 7 PCM 相变过程流线图

Fig. 7 Flow diagram of PCM phase transition

图 8(b) 所示;但储能材料区域靠近中间翅片的部分比之靠近两侧翅片的部分流动更加缓慢,如图 8(c) 所示;图 8(d) 显示 8 h 后产生了 5 个高流速中心,受重力影响整个区域顶部的速度最慢,高速流体从 5 个高流速中心呈花瓣状向整个域顶部不均匀汇集;18.72 h 后中间翅片部分的速度依旧是最快的,两侧的高速中心在两侧各自融合,如图 8(e)、(f) 所示。

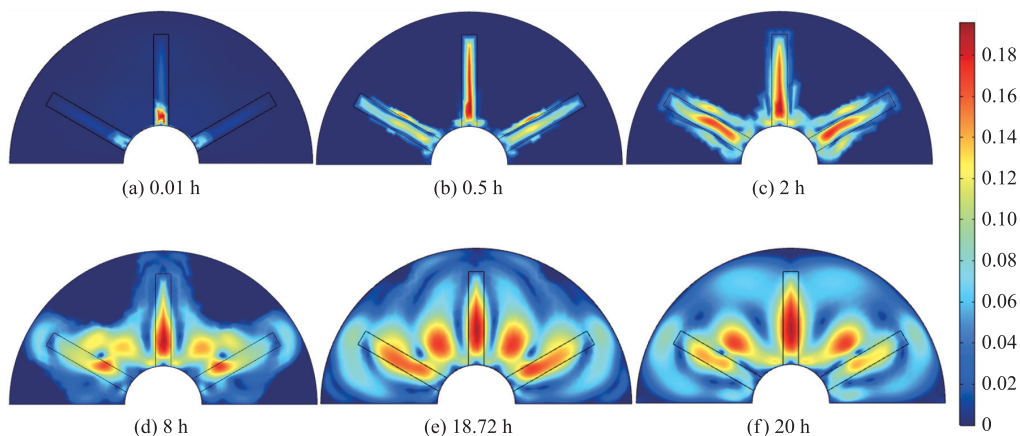


图 8 PCM 相变过程速度云图

Fig. 8 Velocity cloud diagram of PCM phase transition

为更好地研究翅片对储能区域的影响,设置如图 9 所示的监测点(1、11、16、17),分析工作区域中两个翅片表面和相变材料中心的温度、速度变化趋势。

图 10 为 PCM 相变过程中监测点温度随时间的变化曲线。从图中可以看出,远离翅片和内壁面的 16 点温度上升较慢,约 5 h 左右才开始明显上升;而 11 点和 17 点在翅片表面,升温快,且大致趋势一样,但是 17 点温度上升比 11 点更快,且一直高于 11 点温度,直到大约 7 h 后逐渐趋于一致,并在 20 h 后三点逐渐达到一样的温度。

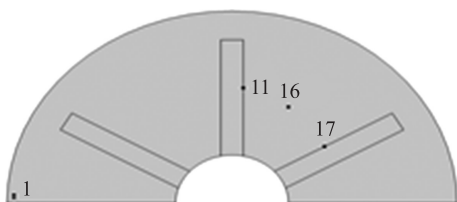


图 9 PCM 相变过程监测点设置

Fig. 9 PCM phase transition process monitoring point setting

图 11 为 PCM 相变过程中监测点速度随时间的变化曲线。从图中可以看出,位于右侧翅片表面的 17 点速度上升最快,但受漩涡和翅片表面的多孔结构影响,其速度并非一直上升,在 4 h 前波动较大,到约 12 h 时由于高速流体中心开始融合,该点受翅片表面边界层的影响速度开始下降。11 点在中间翅片表面,刚开始时速度上升没有 17 点快,也存在波动情况,但 4 h 后该点速度不断上升,到最后远高于另外两点。16 点受翅片影响较小,大约 6 h 后速度才开始上升,并且前期没有明显的速度波动,10 h 后由于其处于 5 个高速流体中心中的一个,其速度变为 3 个监

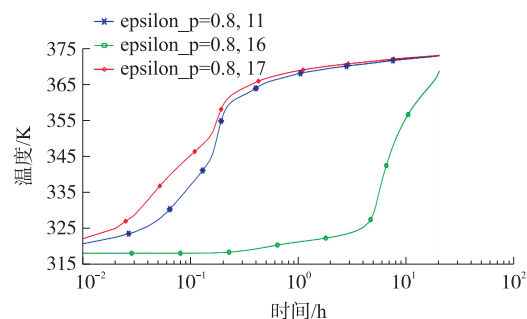


图 10 PCM 相变过程中监测点 11、16、17 处 $T-t$ 图

Fig. 10 $T-t$ diagram of monitoring points 11, 16 and 17 during PCM phase transition

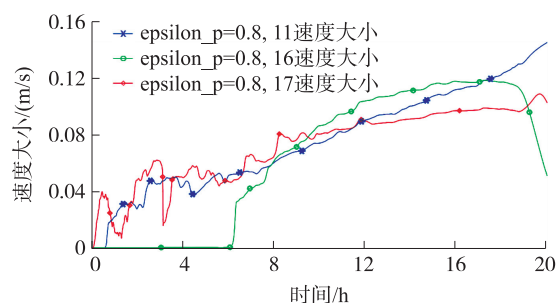


图 11 PCM 相变过程中监测点 11、16、17 点处 $U-t$ 图

Fig. 11 $U-t$ diagram of monitoring points 11, 16 and 17 during PCM phase transition

测点中最快,大约 18 h 后高速流体中心融合,该点区域逐渐变为流动的滞止中心,到 20 h 时该点速度变为最低.

3.2 不同金属泡沫材料对相变储热传热特性的影响

为比较不同金属材料翅片对相变储热传热特性的影响,分别采用金属泡沫铝和金属泡沫铜为多孔介质翅片的固体基底,孔隙率均为 0.8,通过相变过程、等温线变化和流线变化图分析对比不同金属材料对储热过程的影响.

图 12 显示了两种金属材料翅片对储能材料相变过程的影响. 对比图 12(a)和(d)可见,石蜡的相变过程都是从翅片内开始的,且铜材料翅片中的相变速率略高于铝材料翅片中. 随着完全相变从翅片扩展到储能材料区域,铜材料翅片的相变速率仍略高于铝材料翅片的相变速率,如图 12(b)和(e)所示. 图 12(c)和(f)显示 18.72 h 时铜材料翅片工况已完全相变,而铝材料翅片工况仍存在部分未完全相变区域. 后续计算结果表明,铝材料翅片工况完全相变耗时约 19.37 h. 因此,铜金属泡沫翅片的储能效率略优于铝金属泡沫翅片,储热时间缩短约 3.47%.

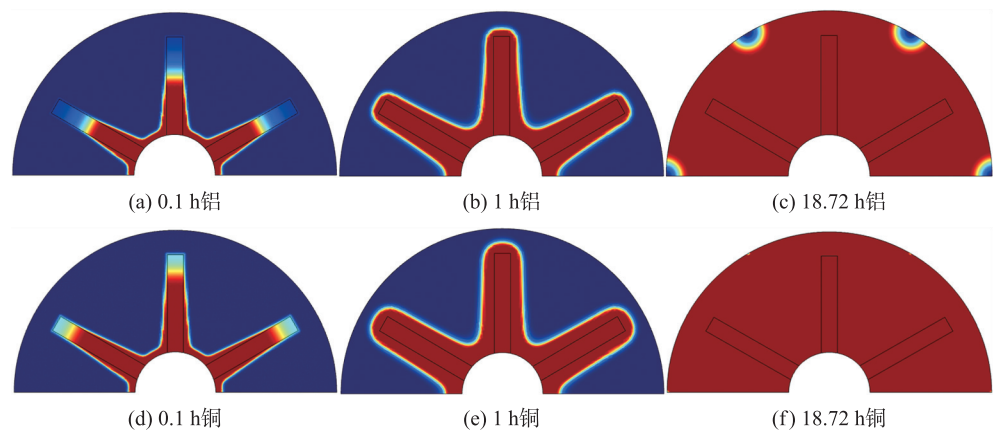


图 12 不同强化翅片时 PCM 相变过程中相分布对比图

Fig. 12 Comparison of phase distribution during PCM phase transition in different reinforced ribs

铝材料的恒压比热容比铜的高出 $515\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,导热系数比铜材料低 $162\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,考虑到泡沫金属结构强化换热以及两种金属恒压热容相差小,这两种泡沫金属的差异对储热时间方面的影响较小. 铝升温所吸收的热量大于铜,同时导热速率比铜慢,相同时间内储能材料区吸收到的热量有了较大差别,导致上述铝材料翅片的储能单元相变速率略低于铜材料翅片储能单元. 从图 13 能清晰看到两种材料的导热区别,正是导热方面的差别,导致在后续的各种变化中二者的趋势虽然一致,但铝材料工况一直落后于铜材料工况.

图 14 为铝、铜两种金属材料翅片的 PCM 相变过程流线图. 对比流线图可以看出,铜材料翅片工况的流线变化进程略快于铝材料翅片工况,但整体上两种金属材料翅片对相变过程的影响基本一致.

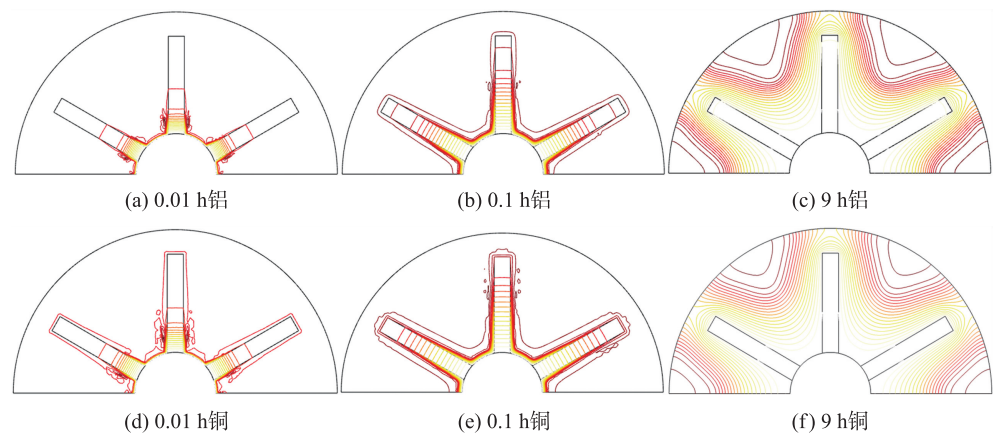


图 13 不同强化翅片时 PCM 相变过程等温线对比图

Fig. 13 Comparison of isotherms of PCM phase transition in different reinforced ribs

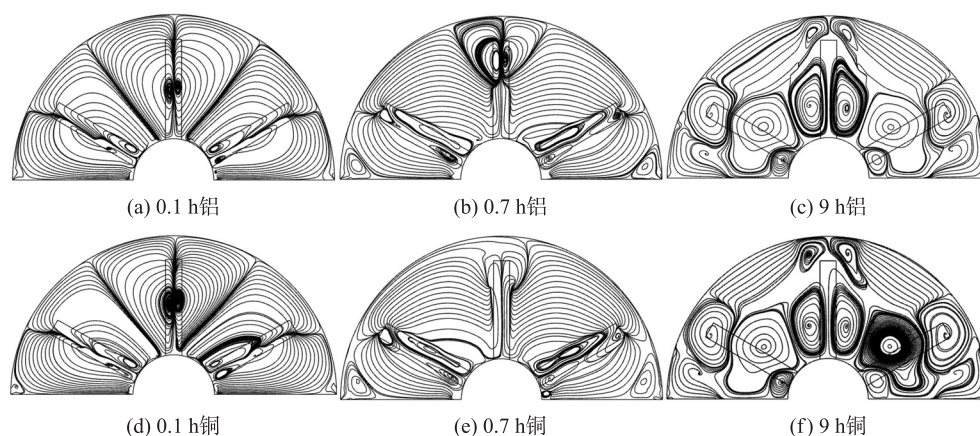


图 14 不同强化翅片时 PCM 相变过程流线对比图

Fig. 14 Streamline comparison of PCM phase transition with different reinforced ribs

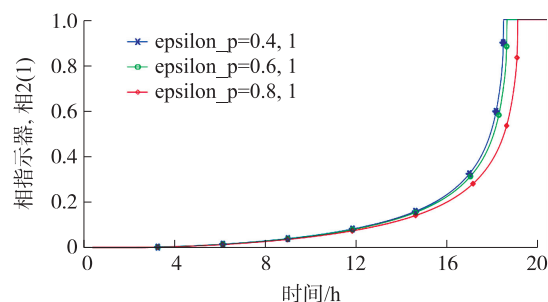
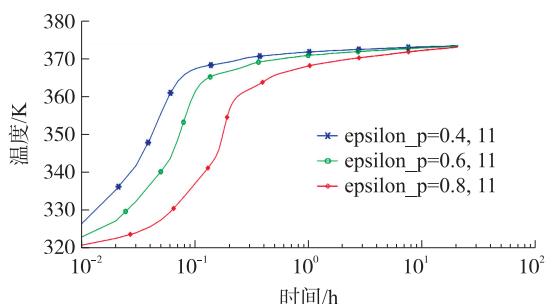
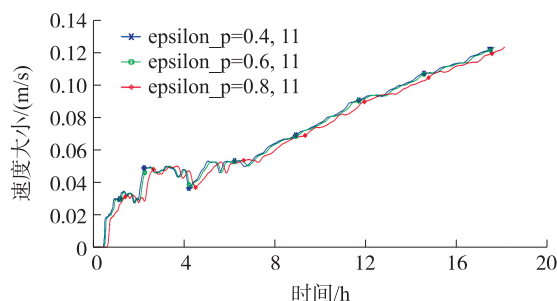
3.3 金属泡沫翅片不同孔隙率对相变储热传热特性的影响

多孔材料的特征是存在大量的孔隙,可以让储能材料附着于多孔介质内部. 相变储能单元可采用金属泡沫翅片来强化传热,一方面,金属泡沫的多孔结构增大了翅片换热面积;另一方面,多孔结构可扰乱整个域的流动,增强对流换热效果. 因此,有必要研究不同孔隙率对相变储热传热特性的影响. 采用铜泡沫翅片,孔隙率分别取 0.4、0.6、0.8,通过对比观察点的速度变化、相变变化及温度变化进行研究.

图 15 为 1 点的相变曲线图. 前面的研究表明,1 点几乎是整个区域最后完成相变的部分. 以此点为观察点,对比分析三种孔隙率对完全相变时间的影响,结果表明,孔隙率为 0.4 时相变时间最短,孔隙率为 0.6 时次之,孔隙率为 0.8 时最慢;相变开始时间则几乎相同,孔隙率为 0.4 和 0.6 之间的区别比孔隙率为 0.6 和 0.8 之间的区别小.

模拟计算结果表明,在不同监测点孔隙率的变化对传热过程的影响规律是相似的. 因此,以 11 监测点为例,分析孔隙率变化对其温度的影响. 图 16 为不同孔隙率(0.4、0.6、0.8)时,11 监测点温度 T 随时间 t 的变化曲线. 从图 16 可以看出,当孔隙率为 0.4 时,升温速率最快,升温速率从大到小对应的孔隙率依次为 0.4、0.6、0.8.

图 17 所示为不同孔隙率(0.4、0.6、0.8)时,11 监测点速度变化曲线. 从图 17 可以看出,不同孔隙率时速度变化曲线十分相似,孔隙率对速度变化曲线的影响更近似于一种相位上的差别,0.8 孔隙率的工况对比另外两工况,其曲线类似于往 x 轴正方向移动了部分相位差.

图 15 PCM 相变过程中监测点 1 处的 $\theta-t$ 图Fig. 15 $\theta-t$ diagram at monitoring point 1 during PCM phase transition图 16 PCM 相变过程中监测点 11 点处 $T-t$ 图Fig. 16 $T-t$ diagram at 11 monitoring points during PCM phase transition图 17 PCM 相变过程中监测点 11 点处 $U-t$ 图Fig. 17 $U-t$ diagram at 11 monitoring points during PCM phase transition

4 结论

通过数值模拟,对含强化翅片的PCM相变储热过程及传热特性进行了研究,分析了不同金属泡沫翅片对储热性能的影响,探讨了孔隙率变化对相变储热过程换热特性的影响,得到以下结论:

(1)采用金属泡沫翅片能够增强导热和对流效应,优化流场对流涡分布,相变过程首先从翅片内部开始,对比无翅片的情况,相变储热时间大大缩短,仅为无翅片工况时的16.8%.

(2)铜金属泡沫翅片的储能效率略优于铝金属泡沫翅片,储热时间缩短了3.47%.

(3)孔隙率的变化对整体相变过程的影响较小,当孔隙率为0.4时,储能材料完成相变时间最短,0.6孔隙率工况次之,0.8孔隙率工况最慢.

[参考文献]

- [1] 韩广顺,丁红胜,王培伦,等. 偏心管翅式相变储热单元性能强化的模拟[J]. 节能技术,2015,33(6):483-488,508.
- [2] 罗仡,陆佳平,钱静,等. 冷藏系统相变储能装置结构设计[J]. 轻工机械,2016,34(2):73-76.
- [3] 王君雷,徐祥贵,孙通,等. 一种螺旋翅片式相变储热单元的储热优化模拟[J]. 储能科学与技术. 2021,10(2):514-522.
- [4] 崔洁,郭治塘,王国峰,等. 翅片管式相变储能换热器蓄放热性能的数值研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版),2020,16(3):24-28.
- [5] 朱子钦,肖胜蓝,施松鹤,等. 相变材料在含翅片球形容器内的约束熔化传热过程[J]. 科学通报,2015,60(12):1125-1131.
- [6] 范宗良,高轩,张飞龙,等. Y型纵翅片管式相变蓄热过程模拟[J]. 甘肃科学学报,2017,29(2):74-78.
- [7] 喻家帮,牛朝阳,韦攀,等. 金属泡沫/翅片填充管蓄热性能的实验研究[J]. 西安交通大学学报,2019,53(1):122-128.
- [8] 顾思忠. 多孔金属泡沫散热模型内部流动和换热特性研究[D]. 天津:天津商业大学,2019.
- [9] 邬可谊. 金属泡沫相变蓄热换热器在余热利用中的模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(5):153-158.
- [10] 孙国轩. 管内封装相变蓄热单元性能实验及数值研究[D]. 大连:大连理工大学,2019.
- [11] 翁榆芳,品源财,霍冠忠,等. 生物质原料特质引起的非均相催化剂激活及缓解方法研究进展[J]. 福建师范大学学报(自然科学版),2023,39(5):50-68.
- [12] 侯娜娜,李树廉,张东,等. 微细通道内过冷水温度对蒸汽直接接触间歇凝结界面波动的影响研究[J]. 南京师大学报(自然科学版),2021,45(1):22-31.
- [13] 李文正,吴薇,夏曼,等. 蓄能供热型太阳能集热器结构优化[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2022,22(3):1-8.
- [14] 陈心竹,张霞,陈莹,等. 压电风扇激励射流强化凸表面换热研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2024,24(1):18-25.

[责任编辑:杜忆忱]