



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404915

引用格式:郭嘉敏,马瑞,王子龙,等.堆积床流道内单个相变胶囊储释热特性数值模拟[J].科学技术与工程,2025,25(14):5849-5861.

Guo Jiamin, Ma Rui, Wang Zilong, et al. Numerical simulation of heat storage and release characteristics of individual phase change capsules in a stacked bed flow channel[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(14): 5849-5861.

能源与动力工程

堆积床流道内单个相变胶囊储释热特性数值模拟

郭嘉敏^{1,2}, 马瑞^{1,2*}, 王子龙^{1,2}, 王峰^{1,2}

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010000; 2. 内蒙古自治区风能太阳能利用机理及优化重点实验室, 呼和浩特 010000)

摘要 相变胶囊装填在容器内形成堆积床储热单元是目前相变胶囊典型的应用方式。研究堆积床流道中单个相变胶囊的储热释热特性可以帮助优化中温相变储热系统的设计。因此建立了相变胶囊二维堆积床流道数值模型,对比研究了外部传热流体以顺重力方向、逆重力方向及垂直重力方向流过相变胶囊时胶囊内部的传热与流动特性,并研究了传热流体流速、温度及胶囊直径对相变胶囊融化过程的影响。结果表明:堆积床流道内相变胶囊迎风侧换热速率更快。由于空腔空气热阻与自然对流作用,传热流体逆流流动时完全凝固时间最短。相较于顺流,逆流的完全凝固时间缩短 8.9%;相变胶囊直径为 12 mm 时,PTFE 为壁材空腔在中心相变胶囊较 304 不锈钢相变胶囊融化速度慢 1.45%,平均储热速率低 1.5%。改性 PTFE 为壁材空腔在中心的相变胶囊较 304 不锈钢相变胶囊融化速度快 6.9%,平均储热速率高 5.8%;提高 HTF 入口速度和温度可以提高相变胶囊的平均储热速率及缩短相变胶囊的融化时间。胶囊的储释热特性对于胶囊单体及中温相变储热系统的设计优化和实际应用都具有重要的指导意义。

关键词 相变胶囊;储热;空腔位置

中图分类号 TK513.5;

文献标志码 A

Numerical Simulation of Heat Storage and Release Characteristics of Individual Phase Change Capsules in a Stacked Bed Flow Channel

GUO Jia-min^{1,2}, MA Rui^{1,2*}, WANG Zi-long^{1,2}, WANG Feng^{1,2}

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010000, China;

2. Key Laboratory of Mechanism and Optimization of Wind and Solar Energy Utilization in Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010000, China)

[Abstract] Filling phase change capsules in a container to form a packed bed heat storage unit is a typical application of phase change capsules. Phase change capsules are usually stacked in a specific layout in the packed bed flow channel. Studying the heat storage and release characteristics of a single phase change capsule in a packed bed flow channel can help optimize the design of a medium-temperature phase change heat storage system. Therefore, a two-dimensional packed bed numerical model of phase change capsules was established. The heat transfer and flow characteristics of the external heat transfer fluid flowing through the phase change capsules in the direction of gravity, counter gravity and vertical gravity were compared and studied. The effects of flow rate, temperature and capsule diameter on the melting process of phase change capsules were studied. The results show that the heat transfer rate of the windward side of the phase change capsule in the packed bed channel is faster. Due to the thermal resistance of the cavity air and the natural convection, the complete solidification time is the shortest when the heat transfer fluid flows countercurrently. Compared with the downstream flow, the complete solidification time of the upstream flow is shortened by 8.9%. When the diameter of the phase change capsule is 12 mm, the melting speed of the phase change capsule with PTFE as the wall material in the center is 1.45% slower than that of the 304 stainless steel phase change capsule, and the average heat storage rate is 1.5% lower. The melting rate of the phase change capsule with modified PTFE as the wall material cavity in the center is 6.9% faster than that of the 304 stainless steel phase change capsule, and the average heat storage rate is 5.8% higher. Increasing the HTF inlet velocity and temperature can increase the average heat storage rate of the phase change capsule and shorten the melting time of the phase change

收稿日期:2024-07-01; 修订日期:2025-02-26

基金项目:内蒙古自治区科技计划(2021GG0253,2021ZD0036);内蒙古自治区教育厅青年科技人才项目(NJYT24012);内蒙古自治区高校科研项目(JY20220110);内蒙古自然科学基金(2024MS05044)

第一作者:郭嘉敏(1999—),男,汉族,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生。研究方向:相变材料的胶囊封装。E-mail:2578006560@qq.com。

*通信作者:马瑞(1988—),女,汉族,内蒙古鄂尔多斯人,博士,副教授。研究方向:储能技术、先进制冷技术、微重力两相流及强化换热技术。E-mail:mrl12593@126.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

capsule. The heat storage and release characteristics of the capsule have important guiding significance for the design optimization and practical application of the capsule monomer and the medium temperature phase change heat storage system.

[**Keywords**] phase change capsule; heat storage; cavity position

胶囊储释热过程中内部的流动和传热特性分析对于胶囊单体及储热系统的设计优化和实际应用都具有重要的指导意义。已有大量关于胶囊相变过程的研究,在融化方面,陈俊旗等^[1]针对自然对流对方腔内的相变石蜡融化蓄热性能的影响开展理论与试验研究。研究表明,自然对流对方腔内相变石蜡的融化蓄热效率有显著影响。在融化初期,热量传输主要由热传导提供,而当液相层厚度超过 2 mm 后,自然对流传热逐渐显著,加速了融化速率并形成了不规则的融化前缘。Tian 等^[2]对太阳盐在球形胶囊中的熔融过程进行了可视化实验和模拟研究。研究表明整个融化过程中,除了短暂的初始融化期外,固体相变材料(phase change material, PCM)上部的温度和流速明显较高。因此,在固体块的上部区域比底部区域发生更强烈的融化过程。Bouzenada 等^[3]通过数值模拟方法,探讨了在不同 Stefan 数和内管位置条件下,球形相变胶囊中的热分布和融化时间。研究结果表明,内管位置和 Stefan 数对球形相变胶囊中的温度分布和融化时间有显著影响。通过调整内管位置和控制内管壁温度,可以优化 PCM 的储热性能。刘永强^[4]对带有空腔的相变胶囊融化过程进行了模拟,模拟结果显示胶囊内液相 PCM 的自然对流加速了融化过程的进行,胶囊内部空腔的存在不利于融化过程的进行。陈哲^[5]通过数值模拟研究了空腔大小对相变胶囊融化速度的影响,当空隙率由 10% 增加到 20% 时相变胶囊的融化时间缩短了 18.9%。Sun 等^[6]研究了常重力($g = 9.81 \text{ m/s}^2$)和低重力($g = 1.63 \text{ m/s}^2$)下 Marangoni 对流对相变胶囊融化的影响,结果显示在常重力下 Marangoni 对流对融化速度的影响较小,但直径为 12 mm 的相变胶囊在低重力下,融化速度受 Marangoni 对流的影响达到了 19%。

许多数值和实验研究表明,除了不同的重力加速度值外,相变胶囊的设计、热分层效应、倾斜角度,以及翅片结构对相变材料的融化行为具有显著的影响,导致融化时间、对流强度等其他属性发生显著变化。王凌皓等^[7]对含有相变胶囊的混合储能水箱特性进行模拟研究。研究结果表明,相变胶囊的高度和尺寸对热分层效果有显著影响,而入口流速的变化对热分层效果的影响更为显著。Mao 等^[8]建立了一个三维数值模型,模拟了不同结构的相变胶囊的储热特性。研究结果表明与传统球形胶囊和直线通道胶囊相比,新型波浪通道胶囊的融

化速率显著提高了 38.0% 和 15.4%。Avci 等^[9]通过实验研究调查了倾斜角对带有和不带 PCM 的平面型散热器热性能的影响。实验结果表明,倾斜角会增强带 PCM 的散热器的热性能,而对不带 PCM 的散热器来说,其影响可以忽略不计。Khobragade 等^[10]对同时充放电(simultaneous charge and discharge, SCD)条件下的潜热存储系统(latent heat storage system, LHSS)进行了数值研究。评估了倾角对 SCD 条件下 LHSS 热性能的影响。结果表明,自然对流的强度取决于 LHSS 的倾斜度。与垂直(90°)和其他角度相比,水平(0°)系统的自然对流强度更高。Yoladi 等^[11]发现倾角对纯相变材料熔融过程中自然对流的形成和发展、固液界面的传播和传热速率有很大影响。在不同输入温度、速度、持续时间和斜坡角度下进行的实验结果表明,在充电过程中对传热流体的热性能有显著影响。毛前军等^[12]对球形胶囊蓄热单元进行了传热特性分析,研究结果表明,球形胶囊内添加翅片可以增强相变材料的融化,且翅片长度的增加有助于温度分布的均匀化。Karami 等^[13]对倾斜角范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的翅片外壳中 PCM 融化的影响研究。结果表明,外壳倾角从 180° 降低到 0° ,加剧了对流的发展,并在液态相变材料区域形成涡流,最终缩短了相变材料的融化时间。Hong 等^[14]进行了数值模拟,研究了具有部分热加热壁的矩形空腔中的能量存储特性,其倾斜角范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$,分别在 0.5 和 0° 的纵横比和倾角下实现了储能系统的最佳性能。

综上,目前针对相变胶囊的研究中,数值研究主要集中于相变胶囊单体的储热过程,对于单个相变胶囊在流道中的研究比较缺乏。此外,空腔位置会影响胶囊内相变材料与传热流体之间的传热路径,传热流体的流动方向也显著影响相变材料与流体之间的传热速率。因此,现建立相变胶囊二维堆积床流道数值模型,研究外部传热流体以顺重力方向、逆重力方向、垂直重力方向三种流向流过相变胶囊时胶囊内部的传热与流动特性,并对空腔在中心与空腔在顶部两种胶囊结构相变胶囊的相变过程进行数值模拟研究。

1 模型建立

1.1 模型简化

典型的堆积床储热单元的容器为圆柱形罐体,罐内填充有相变胶囊,传热流体在胶囊之间的缝隙

流动。图1为堆积床储热单元示意图。

在研究堆积床储热单元内流动和传热特性时,相变胶囊的排列非常复杂,因此对模型进行简化并提出假设如下。

(1)相变胶囊在堆积床内按照有序或无序方式排列,由于无序排列中每个胶囊所处的流场环境都不相同,无法获得相变胶囊性能的一般性规律。因此本文基于有序排列建立模型,同时为增强堆积床内流场的复杂程度,假设堆积床内相变胶囊为有序错排堆积。

(2)堆积床具有轴对称的几何结构和边界条件,可将模型简化为二维模型。由于相变胶囊之间是点接触,直接将三维模型转变为二维模型将导致堆积床内没有流动通道,因此假设相变胶囊间不接触,同时认为相变胶囊间不直接进行换热^[15]。图2为三维转变为二维示意图。

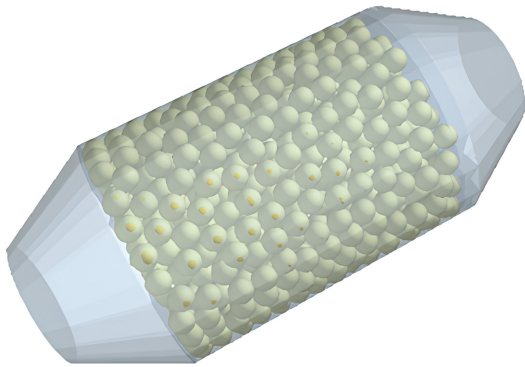


图1 堆积床储热单元示意图

Fig. 1 Schematic diagram of packed bed heat storage unit

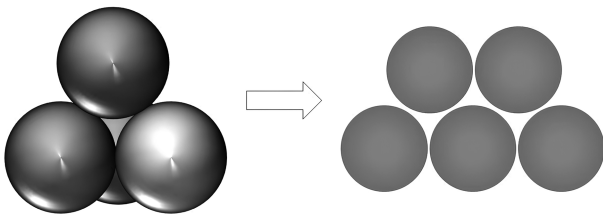


图2 三维转变为二维示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 3D transformation into 2D

基于上述假设,本文研究对模型进行了简化,堆积床流道内不考虑其他相变胶囊的情况下,单纯研究单个相变胶囊在堆积床流道内的储释热特性。图3为建立的简化二维堆积床物理模型,包含流道和蓝色单个胶囊,白色胶囊在实际模拟中忽略。相变胶囊外径20 mm,内径18 mm。

1.2 边界条件及求解设置

相变胶囊中的相变材料为太阳盐(60wt% NaNO₃-40wt% KNO₃),空气为传热流体,其物性参数如表1所示。

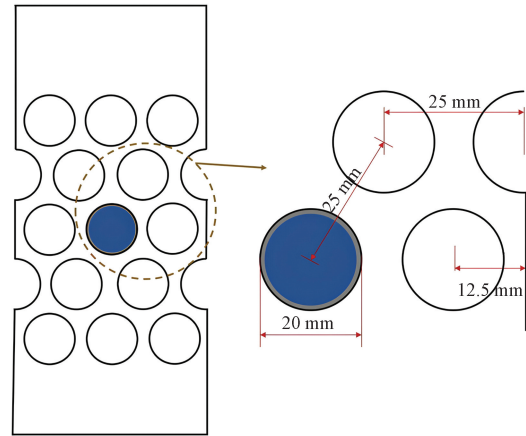


图3 二维堆积床模型

Fig. 3 Two-dimensional packed bed model

表1 太阳盐和空气的热物性参数^[16]

Table 1 Thermophysical parameters of solar salt and air^[16]

热物性参数	太阳盐 (60wt% NaNO ₃ -40wt% KNO ₃)	空气
密度/(kg·m ⁻³)	1 925	1. 225
潜热/(J·kg ⁻¹)	96 060	1 006. 43
比热容/[J·(kg·K) ⁻¹]	1 520	—
导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	0. 45(液), 0. 75(固)	0. 024 2
动力黏度/(Pa·s)	0. 006 93	0. 000 017 894
热膨胀系数/K ⁻¹	0. 000 375	—
固相温度/K	493. 35	—
液相温度/K	518. 45	—

采用 SIMPLE 算法对压力-速度场耦合求解。流道内传热流体的流动使用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行计算,胶囊内相变材料的自然对流采用层流模型进行计算。能量和动量方程的离散采用二阶迎风格式,湍动能方程和湍流耗散率方程采用一阶迎风格式。VOF 方法的界面重构方式为几何重构法。数值计算中能量方程的残差标准为 10^{-6} ,连续性方程的残差标准为 10^{-4} ,动量方程、湍流方程的残差标准为 10^{-3} 。时间步长设置为 0. 005 s。

流道入口为速度入口,出口为压力出口。换热流体与相变胶囊表面的 Coupled 边界条件为

$$k_{\text{shell}} \frac{\partial T_{\text{shell}}}{\partial x_i} = h_f (T_{\text{air}} - T_{\text{shell}}) \quad (1)$$

式(1)中: k_{shell} 为相变胶囊壁材导热系数,W/(m·K); T_{air} 为传热流体的温度,K; T_{shell} 为相变胶囊表面温度,K; h_f 为对流换热系数,W/(m²·K); x_i 为空间坐标。

1.3 控制方程

采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型计算堆积床内部传热流体的流动过程。相变胶囊内部的固液相变过程

仍采用焓-孔隙率法进行求解,胶囊内仍使用VOF方法对空气-相变材料界面进行追踪。为了加快计算速度,提升计算稳定性,进行了以下假设。

(1) 传热流体为不可压缩流体,换热过程中热物性参数为常数。

(2) 忽略流道壁面热损失,认为壁面为绝热壁面。

(3) 忽略传热流体与相变胶囊间的辐射传热。

基于上述假设,建立了二维强制对流传热的数学模型。连续性方程、能量方程、动量方程如下^[17]。

(1) 连续性方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

式(2)中: ρ 为流体的密度; t 为时间; u_i 为流体在*i*方向的速度分量。

(2) 动量方程。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \rho g + \\ & \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left[(\mu_t + \mu) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] - \right. \\ & \left. (\rho \overline{u'_i u'_j}) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中: u_j 为流体在*j*方向的速度分量; μ_t 为湍流黏度项; $\overline{u'_i u'_j}$ 为湍流引起的附加应力。

(3) 能量方程。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i E) = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(k + \frac{c_p \mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (u_{ij})_{\text{eff}} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中: E 为单位质量的总能; c_p 为定压比热容; σ_T 为湍流普朗特数; $(u_{ij})_{\text{eff}}$ 为有效应力。

(4) RNG *k-ε* 湍流模型 *k* 方程。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (5)$$

(5) RNG *k-ε* 湍流模型 *ε* 方程。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中: ε 为湍流动能耗散率; σ_ε 为湍流耗散率的普朗特数; $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为经验常数, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$; G_k 为湍动能源项; G_b 为浮升力引起的湍流源项; R_ε 为 ε 方程源项。

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (8)$$

$$G_b = \beta g \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (9)$$

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \left(\frac{Sk}{\varepsilon} \right)^3 \left[1 - \left(\frac{Sk}{\varepsilon} \right) / 4.38 \right] \varepsilon^3}{1 + 0.012 \left(\frac{Sk}{\varepsilon} \right)^3 k} \quad (10)$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}^2} \quad (11)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

式中: $\sigma_T = 1.0$; $\sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0.72$; $C_\mu = 0.0845$; $C_{1\varepsilon} = 1.42$; $C_{2\varepsilon} = 1.68$; $\gamma_0 = 4.38$; $Pr_t = 0.85$ 。

1.4 网格无关性验证

为了消除网格数量对模拟结果的影响,对模型进行了网格无关行验证。在 MESH 软件中绘制了网格数分别为 228 546、296 541、354 816、419 099、476 498、522 622、584 124 共 7 种网格。图 4 给出了 5 种网格模拟融化过程的完全融化时间,完全融化时间随着网格数的增加而缩短,最终趋于稳定,网格数为 419 099 与网格数为 476 498 两种网格的完全融化时间仅相差 0.6 s。为了节省计算资源并保证计算结果的准确性,选择网格数为 419 099 的网格为计算网格。网格细节如图 5 所示。

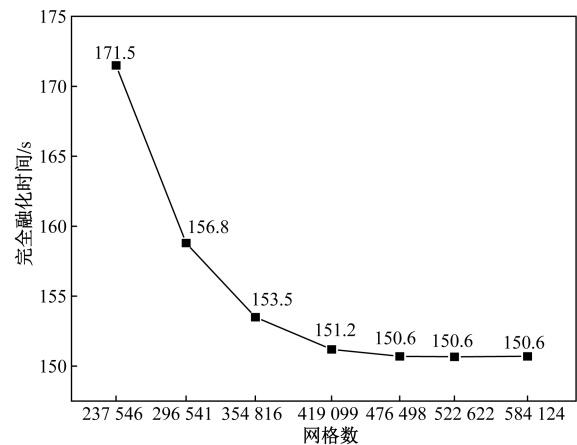


图4 网格无关性验证

Fig. 4 Verification of grid independence

1.5 模型验证

为了验证所用模型的正确性,将本文方法所得出的模拟结果与文献[18]的实验结果进行对比。依据文献的实验条件建立模型,相变胶囊的直径为 80 mm,相变材料的填充体积为 85%,顶部预留空气体积为 15%,相变材料选用 RT27,外壳为 2 mm 厚的玻璃,胶囊顶部有一段玻璃延长出口

管,融化过程中相变材料膨胀后,胶囊内部的空气可以通过出口玻璃管排出。实验中相变胶囊被浸没在 312.15 K 的水浴加热环境中,相变材料初始温度为 296 K,低于熔点,保持初始相变材料状态为固态。图 6 给出了胶囊融化过程中液相率的变化曲线,计算结果与文献[18]的实验结果基本重合,说明本文建立的数值模型可以用于相变材料的相变模拟。

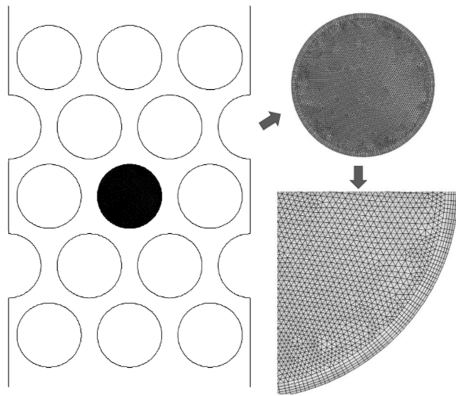


图 5 网格细节
Fig. 5 Grid details

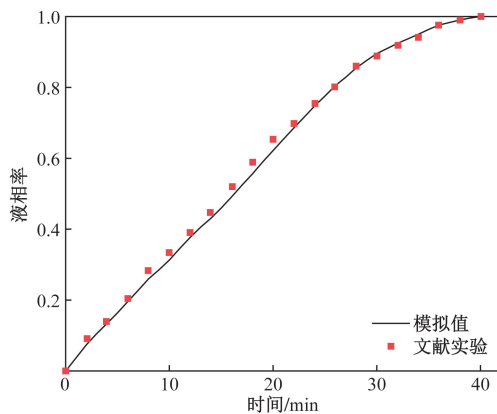


图 6 模拟液相率结果与文献结果对比
Fig. 6 Comparison of simulated liquid fraction results with literature results

2 模拟结果分析

本课题组前期通过实验制备的相变胶囊壁体材料为聚四氟乙烯 (polytetrafluoroethylene, PTFE), 其具有抗腐蚀、成本低等优点,但其导热系数较低。陶国良^[19]以聚四氟乙烯为基材,石墨为导热填料,制备了改性聚四氟乙烯 (70wt% PTFE-30wt% 石墨),该复合材料具有较高的导热系数同时也具有优秀的力学性能,可以满足实际需求。本节模拟了以 304 不锈钢、PTFE、改性 PTFE,3 种材料为壁材的相变胶囊融化过程。表 2 给出了三种壁材的热物性参数。

表 2 壁材物性参数^[19-20]

Table 2 Shell material physical properties parameters^[19-20]

名称	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数/[$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]
304 不锈钢	8 030	16.3~21.5
聚四氟乙烯	2 200	0.24~0.35
改性聚四氟乙烯	2 200	1.2

2.1 胶囊直径对融化速度的影响

对堆积床流道模型进行了等比例缩放,建立了外径 12、16 mm 两种直径相变胶囊的流道模型,并进行了模拟计算,以研究胶囊直径对储热速率的影响。胶囊壁厚 1 mm,传热流体入口温度 553.15 K,入口速度 0.1 m/s,相变胶囊初始温度 493 K。图 7 给出了 12、16、20 mm 三种直径相变胶囊融化过程的液相率随时间变化曲线。如图所示,相变胶囊完全融化时间随着胶囊直径的变小而缩短。304 不锈钢、改性 PTFE、PTFE 相变胶囊在直径为 20 mm 时的完全融化时间分别为 1 218、1 295、1 367 s,相比于 304 不锈钢胶囊,改性 PTFE 胶囊和 PTFE 胶囊的融化速度分别慢 6.23% 和 12.2%。在胶囊直径为 16 mm 时,304 不锈钢、改性 PTFE、PTFE 相变胶囊的完全融化时间分别为 918、880、934 s,改性 PTFE 胶囊的融化速度最快,相比于 304 不锈钢相变胶囊,改性 PTFE 胶囊的融化速度快 4.1%,PTFE 胶囊的融化速度慢 1.7%。胶囊直径为 12 mm 时,304 不锈钢、改性 PTFE、PTFE 相变胶囊的完全融化时间分别为 542、512、550 s,相比于 304 不锈钢相变胶囊,改性 PTFE 胶囊的融化速度快 6.9%,PTFE 胶囊的融化速度慢 1.5%。

图 8 给出了不同直径相变胶囊融化过程的平均储热速率。从图 8 可知,相变胶囊的平均储热速率随着胶囊直径的变大而变大,这是因为胶囊直径变

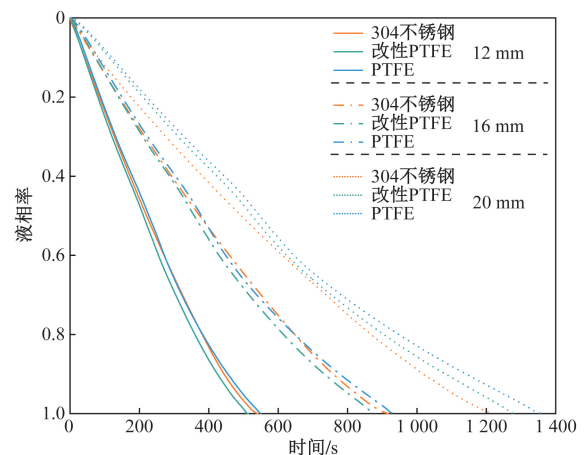


图 7 不同直径相变胶囊融化过程的液相率变化曲线
Fig. 7 Variation curves of liquid phase rate during melting of phase change capsules with different diameters

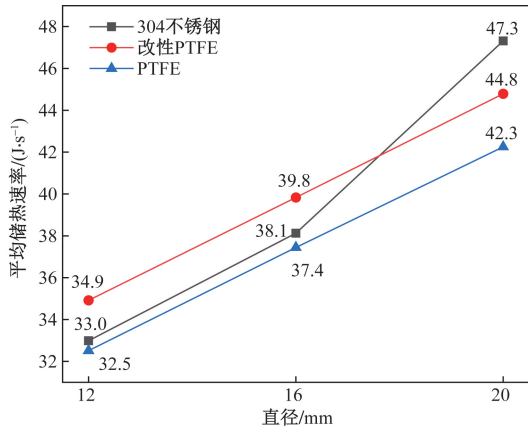


图8 不同直径相变胶囊融化过程的平均储热速率
Fig. 8 Average heat storage rate during melting of phase change capsules with different diameters

大,使胶囊有更大的换热面积,从而使储热速率变大。当直径为 20 mm 时,304 不锈钢胶囊的平均储热速率最大,PTFE 胶囊最小。当直径为 16 mm,改性 PTFE 胶囊的平均储热速率高于 304 不锈钢胶囊 4.5%,PTFE 胶囊的平均储热速率低于 304 不锈钢胶囊 1.8%。当直径为 12 mm 时,改性 PTFE 胶囊的平均储热速率高于 304 不锈钢胶囊 5.8%,PTFE 胶囊的平均储热速率低于 304 不锈钢胶囊 1.45%。空腔在中心的相变胶囊小直径下更具优势。这是由于直径变小胶囊的比表面积变大,空腔在中心的胶囊结构相比于胶囊空腔在顶部的结构有更大的换热面积,从而有更大的换热量。

2.2 流体流动方向对储释热过程的影响

2.2.1 流体流动方向对相变胶囊表面传热特性的影响

堆积床相变储热单元蓄热时,热量由高温传热流体(heat transfer fluid, HTF)传递给低温的相变胶囊;释热时,热量由高温相变胶囊传递给低温的 HTF。在传热过程中,不同的 HTF 入口方向使相变胶囊处于不同的流体环境中,因此胶囊不同位置的对流换热系数不同。本文研究以 HTF 沿重力方向流动为顺流,逆重力方向流动为逆流,垂直重力方向流动为横流,研究了顺流、逆流、横流三种 HTF 流动方向对相变胶囊表面对流换热系数的影响。

图 9 给出了 HTF 流动方向为顺流、逆流两种工况下,近壁面(距相变胶囊 0.5 mm)处 HTF 的温度随角度的变化曲线。从图 9 中可以看出,两种工况下相变胶囊迎风侧的 HTF 温度较高,由于相变胶囊与 HTF 之间的换热,背风侧的 HTF 温度较低。图 10 给出了近壁面 HTF 速度随角度的变化曲线。从图 10 可以看出,迎风侧 HTF 与相变胶囊壁面的传热

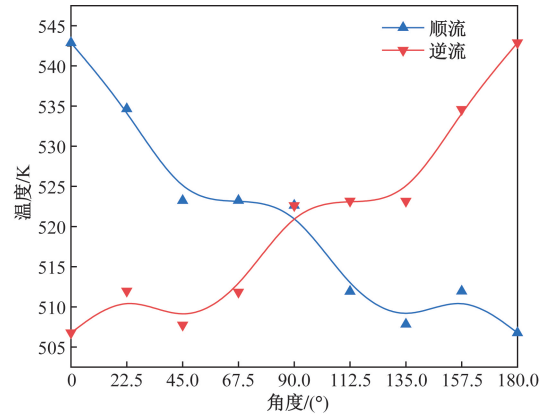


图9 相变胶囊近壁面传热流体温度随角度的变化
Fig. 9 Variation of heat transfer fluid temperature with angle near the wall of the phase change capsule

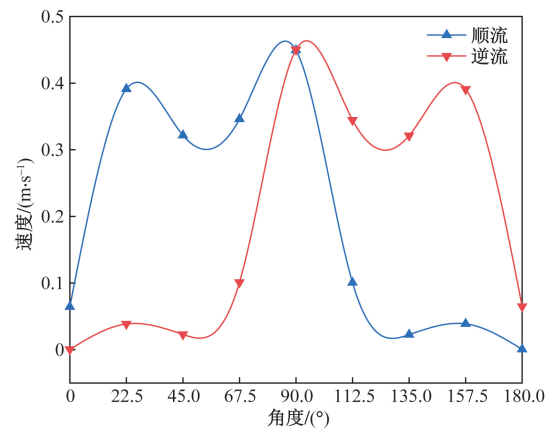


图10 相变胶囊近壁面传热流体速度随角度的变化
Fig. 10 Variation of heat transfer fluid velocity with angle near the wall of the phase change capsule

温差、HTF 流速均大于背风侧。传热流体流动方向直接影响相变胶囊表面不同位置处的对流换热系数,同时胶囊内相变材料的自然对流,空腔处的空气热阻,在不同的 HTF 流动方向下会对换热过程产生不同的影响。图 11 给出了相变胶囊壁面对流换热系数随角度的变化曲线,可以看到,迎风侧的对流换热系数高于背风侧,这与文献[21]趋势一致。

2.2.2 流体流动方向对相变胶囊融化过程的影响

模拟了顺流、逆流和横流三种传热流体流动方向下,以 PTFE 为壁材空腔在中心的相变胶囊和以 304 不锈钢为壁材空腔在顶部两种相变胶囊的融化过程。相变胶囊初始温度为 493 K,外径 20 mm、壁厚 1 mm,传热流体入口温度为 553.15 K,入口速度为 0.1 m/s。图 11 给出了 3 种传热流体流动方向下,以 304 不锈钢为壁材空腔在顶部相变胶囊融化过程 180、540、900 s 时刻的固液相分布。在图 12 中,顺流、逆流、横流的迎风面分别在胶囊的上侧、下侧、左侧。从图 12 中可以看,与单个相变胶囊一

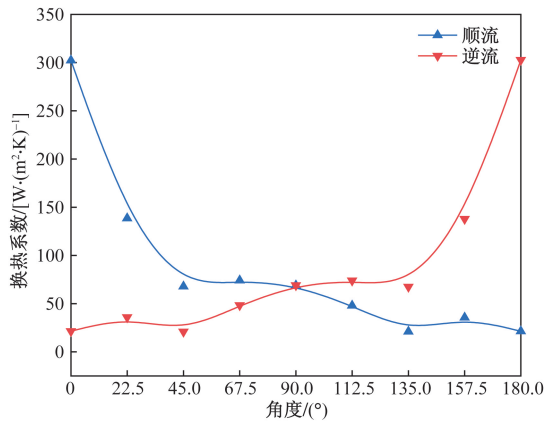


图 11 相变胶囊壁面对流换热系数随角度的变化
Fig. 11 Variation of convective heat transfer coefficient with angle at the wall of phase change capsule

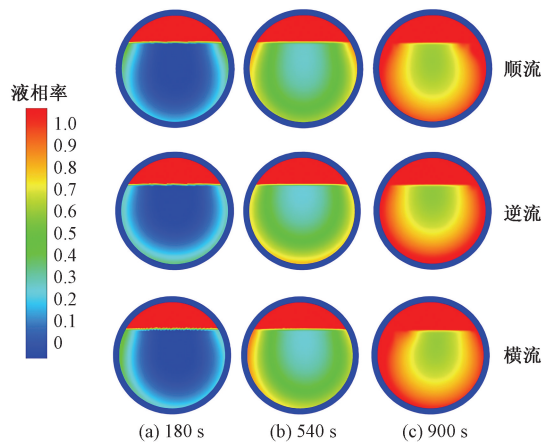


图 12 3种传热流体流动方向下空腔在顶部相变胶囊融化过程固液相分布
Fig. 12 Solid-liquid phase distribution of the phase change capsule melting process at the top of the cavity under the flow direction of the three heat transfer fluids

样,融化最先发生在壁面处,但靠近迎风侧的 PCM 融化较快,这是因为迎风侧的换热更强,使得迎风侧 PCM 接收到的热量更多。

图 13 ~ 图 15 给出了传热流体顺流、逆流、横流 3 种情况下以聚四氟乙烯 (PTFE) 为壁材空腔在中心相变胶囊融化过程中不同时刻的固液相分布云图。从图 13 ~ 图 15 中可以看到,相变胶囊内迎风侧 PCM 融化得更快。FLUENT 把融化中的材料视为多孔介质,随着融化的进行,胶囊上部 PCM 逐渐融化,空腔在重力的作用下上移。这一过程对应图中 360 ~ 540 s,由于传热流体顺流流动时,胶囊上部 PCM 融化的最快,所以该情况下空腔的上移最先完成。

相变胶囊在融化的过程中,已经融化的液相 PCM 在密度差的作用下会形成自然对流,自然对流

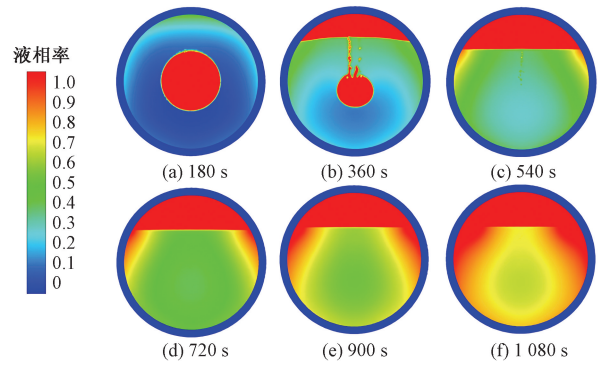


图 13 传热流体顺流流动下空腔在中心相变胶囊融化过程固液相分布

Fig. 13 Solid-liquid phase distribution of the phase change capsule melting process in the center of the cavity under the downstream flow of heat transfer fluid

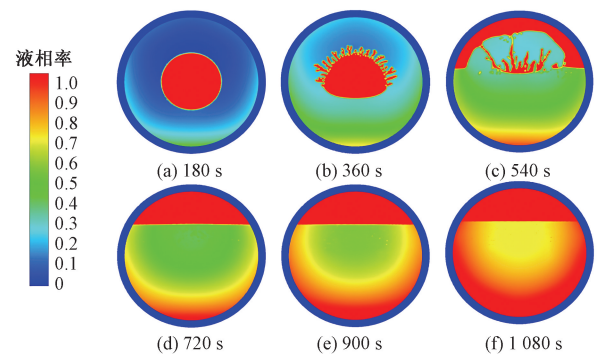


图 14 传热流体逆流流动下空腔在中心相变胶囊融化过程固液相分布

Fig. 14 Solid-liquid phase distribution during phase change capsule melting in the center of the cavity under counter-flow of heat transfer fluid

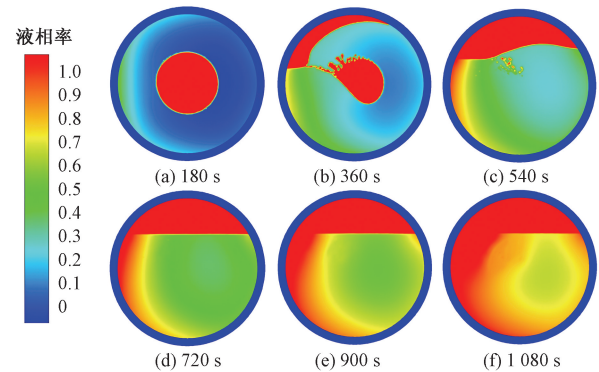


图 15 传热流体横流流动下空腔在中心相变胶囊融化过程固液相分布

Fig. 15 Solid-liquid phase distribution during phase change capsule melting in the center of a cavity under cross-flow of heat transfer fluid

可以加快融化过程,因此对相变胶囊内相变材料的流动情况展开研究是十分必要的。由于相变胶囊融化初期液相 PCM 少,胶囊内自然对流的弱,同时空

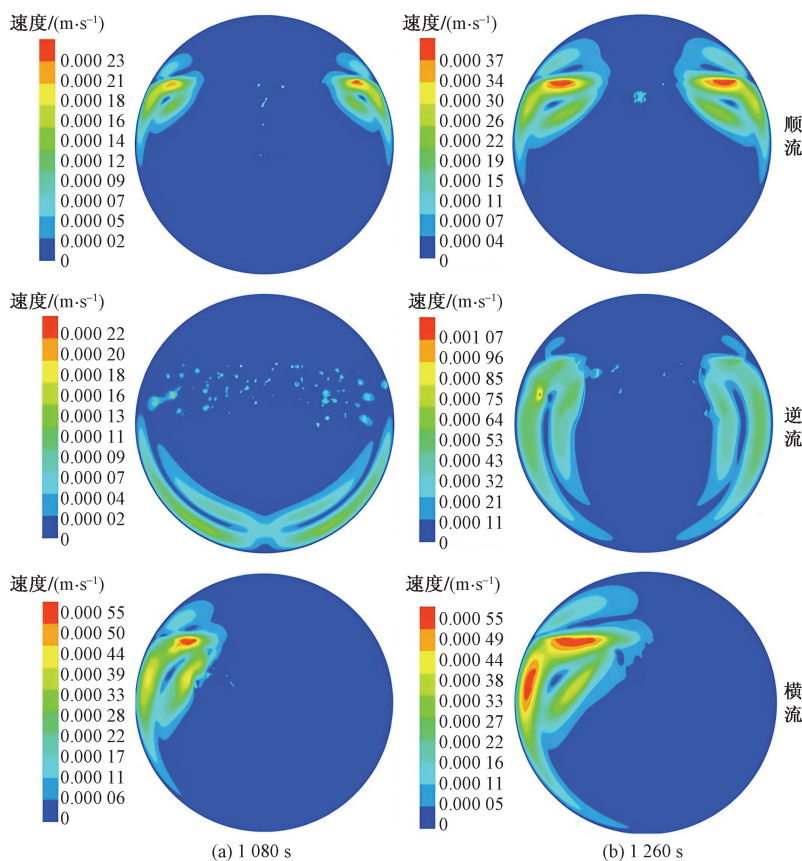


图 16 3 种传热流体流动方向下空腔在中心相变胶囊融化过程速度云图

Fig. 16 Velocity clouds of the phase change capsule melting process in the center of the cavity under the three heat transfer fluid flow directions

腔在中心的相变胶囊融化初期空腔由中心移动至顶部,使得胶囊内速度分布非常混乱,因此图 16 只给出了空腔在中心相变胶囊融化后期 1 080 s 和 1 260 s 时刻的速度云图。如图 16 所示,在传热流体顺流时,胶囊上部为迎风侧,相变胶囊内的自然对流主要发生在胶囊的中上部分,靠近壁面的温度较高的 PCM 上升,温度较低的 PCM 下沉。同时可以看到 1 260 s 时刻胶囊内的自然对流相较于 1 080 s 时刻速度更快,范围更大。自然对流的出现加快了该区域内的融化速度,加之迎风侧换热较快,使得固液相分布呈现出如图 13 所示形状。

传热流体逆流的情况下,胶囊底部为迎风侧,相变胶囊内的自然对流主要发生在胶囊的中下部分,靠近底面的温度较高的 PCM 上升,温度较低的 PCM 下沉。胶囊下部 PCM 靠近迎风面,并且由于自然对流的存在使得此处相变材料融化较快,随着融化的进行,上部 PCM 融化,自然对流上升至中上部,如 1 260 s 时刻所示。

传热流体横流的情况下,胶囊左侧为迎风侧,相变胶囊内的自然对流发生在胶囊的左侧。同样的,迎风侧换热较快,并且存在自然对流,使得胶囊

左侧融化较快。胶囊右侧处于背风侧,换热速度较慢,液相率低,难以形成自然对流。

图 17 给出以 304 不锈钢为壁材空腔在顶部的相变胶囊在 3 种 HTF 流动方向下换热进行 540、720 s 时刻胶囊内部的速度云图。相较于 PTFE 相变胶囊,304 不锈钢相变胶囊内自然对流的范围更大。顺流时自然对流不仅出现在胶囊中上方,还出现在胶囊下部,横流时胶囊内背风侧也出现了微弱的自然对流,逆流时自然对流的范围也更大。这是由于 304 不锈钢的导热性能好,加快了胶囊逆风侧相变材料的融化,使得胶囊逆风侧也能够形成自然对流。

2. 2. 3 流体流动方向对胶囊融化速度的影响

上述分析已经证明传热流体流动方向能够对相变胶囊的融化过程产生影响,为了更加直观地体现这种影响,将以 304 不锈钢为壁材空腔在顶部的相变胶囊,PTFE、改性 PTFE 为壁材空腔在中心的相变胶囊在 HTF 顺流、逆流与横流时完全融化时间的变化曲线绘制在图 18 中。

对于以 PTFE 为壁材,空腔在中心的相变胶囊,其在顺流、横流、逆流时的完全融化时间分别为 1 541、1 479、1 367 s。相较于顺流,逆流和横流的融

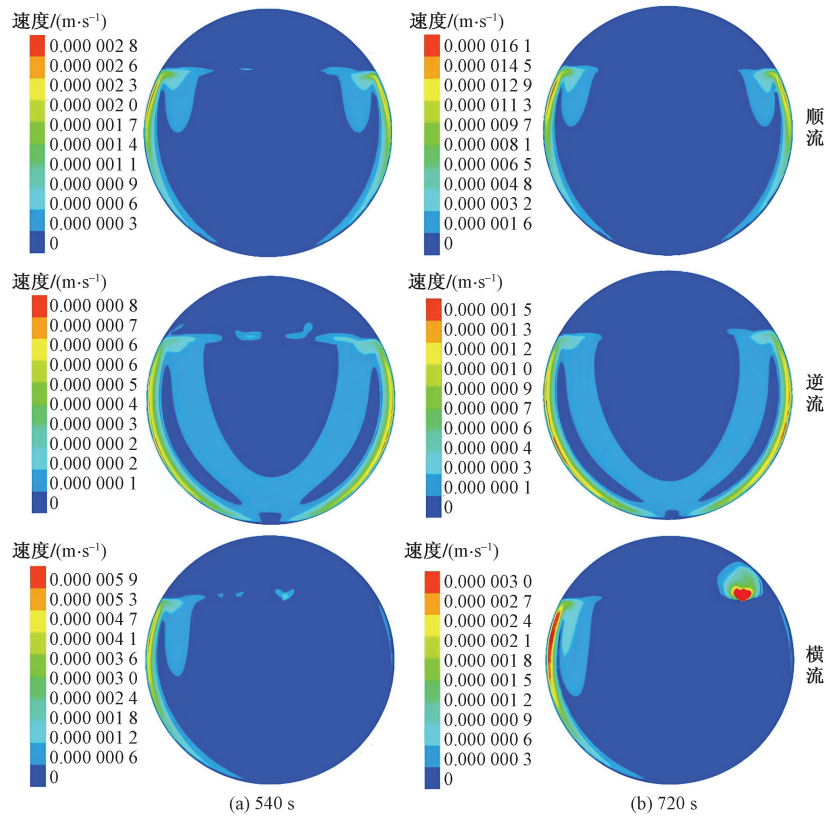


图 17 3 种传热流体流动方向下空腔在顶部相变胶囊融化过程速度云图

Fig. 17 Velocity clouds of the phase change capsule melting process at the top of the cavity under the three heat transfer fluid flow directions

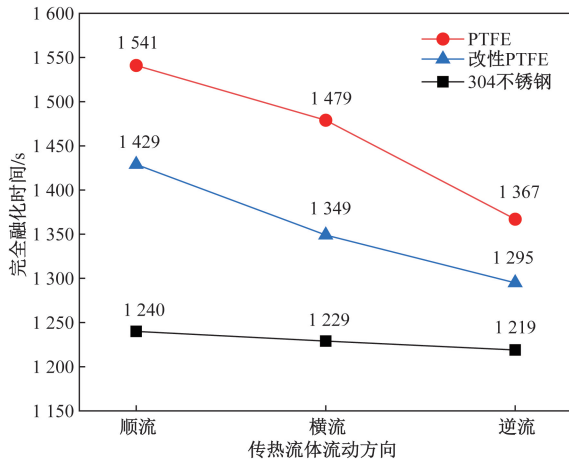


图 18 不同传热流体流动方向下相变胶囊的完全融化时间
Fig. 18 Complete melting time of phase change capsules under different heat transfer fluid flow directions

化速度分别提升了 11.3% 和 4.02%, 这是由于 HTF 逆流流动时, 胶囊下部迎风侧相变材料最先融化, 自然对流发生在底部并向上运动, 这加快了上部 PCM 的融化。而顺流时, 自然对流发生在中上部, 并且由于重力原因难以向底部逆风侧发展, 同时当胶囊内部结构由空腔在中心转变为空腔在顶部后, 顶部空腔隔断了上部迎风面与 PCM 的接触, 空腔的

空气热阻削弱了顺流迎风面作用。横流时, 自然对流发生在左侧迎风侧附近, 难以向右侧背风侧发展。

对于以改性 PTFE 为壁材, 空腔在中心的相变胶囊, 其在顺流、横流、逆流时的完全融化时间分别为 1 429、1 349、1 295 s。相较于顺流, 逆流和横流的融化速度分别提升了 10.56% 和 5.6%, 3 种流动情况的完全融化时间分别低于以 PTFE 为壁材的相变胶囊, 这是由于改性 PTFE 的导热系数较高, 加快了胶囊内 PCM 的融化。

对于以 304 不锈钢为壁材, 空腔在顶部的相变胶囊, 其在顺流、横流、逆流时的完全融化时间分别为 1 240、1 229、1 219 s。相较于顺流, 逆流和横流的融化速度分别提升了 1.77% 和 0.9%, 传热流体流动方向对其完全融化时间的影响较小, 这是由于 304 不锈钢的导热系数很大, 自然对流对其融化速度的影响较小。

304 不锈钢相变胶囊、PTFE 相变胶囊和改性 PTFE 相变胶囊 3 种胶囊在 HTF 逆流流动时的融化速度更快, 完全融化时间分别为 1 218、1 367、1 295 s。与 304 不锈钢相变胶囊相比, PTFE 相变胶囊融化速度慢 12.2%, 改性 PTFE 相变胶囊的融化速度慢 6.23%。

为了更好地评价 3 种相变胶囊的储热能力, 引

入平均储热速率。

$$P_{\text{charge}} = \frac{Q}{t_e} \quad (13)$$

式(13)中: Q 为相变胶囊的储热量; t_e 为融化完成时间。

304 不锈钢相变胶囊、PTFE 相变胶囊和改性 PTFE 相变胶囊 3 种胶囊的平均储热速率分别为 47.31、44.79、42.25 J/s。304 不锈钢胶囊的平均储热速率最大,相比与 304 不锈钢胶囊,PTFE 胶囊、改性 PTFE 胶囊的平均储热速率分别低 10.7%、5.3%。在之前的研究内容已经说明空腔在中心的相变胶囊的融化速度更快是因为具有更大的换热面积从而有更大的换热量,但胶囊处于流道中,其背风侧的换热较差,这间接的削弱了空腔在中心相变胶囊的优势。但在堆积床中,无序排列效率更高,因此堆积床内胶囊多为无序排列^[22]。而无序排列会使堆积床中流场更加混乱,这或许会使流道内胶囊不会出现背风侧或者背风侧面积变小。

2.2.4 流体流动方向对释热过程的影响

模拟了顺流、逆流、横流 3 种 HTF 流动方向相变胶囊的凝固过程。计算所用的相变胶囊模型直径 20 mm,壁厚 1 mm,壁材为 PTFE,胶囊顶部预留有 5% 体积的空腔,初始温度 519 K,HTF 温度 453.15 K,入口速度 0.1 m/s。图 19 给出了 3 种传热流体流动方向下相变胶囊凝固过程的固液相分布。如图 19 所示,靠近壁面的 PCM 凝固较快,固液相界面由胶囊壁面向中心收缩最终完全凝固,同时由于 PCM 由液态变为固态体积减小,胶囊顶部的空腔变得更大。顺流、逆流、横流的迎风面分别在上侧、下侧、左侧,可以看到靠近迎风侧的相变材料凝固较快,这是因为迎风侧的换热速度高于背风侧。

图 20 给出 3 种传热流体流动方向下 PTFE 相

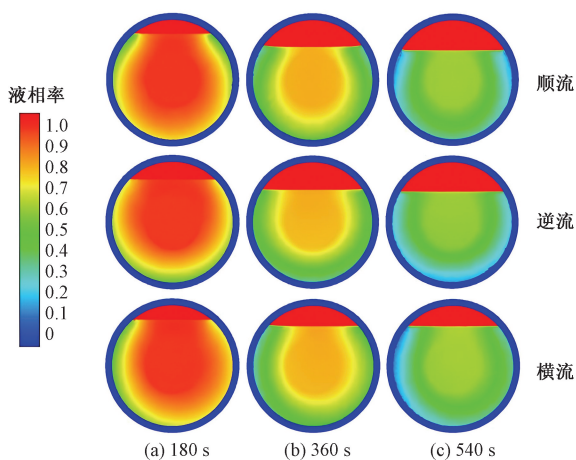


图 19 3 种传热流体流动方向下相变胶囊凝固过程固液分布

Fig. 19 Solid-liquid distribution of phase change capsule solidif

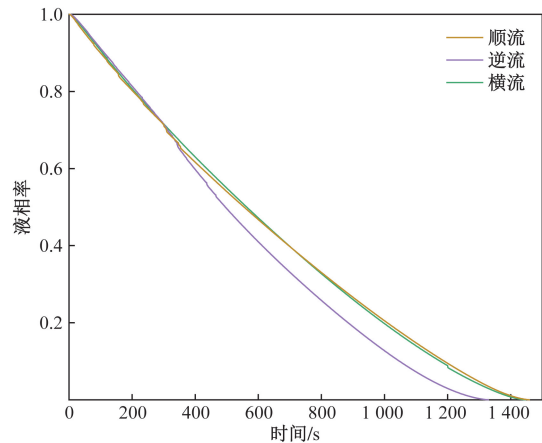


图 20 3 种传热流体流动方向相变胶囊凝固过程液相率变化曲线

Fig. 20 Variation curves of liquid phase rate during solidification of phase change capsules

变胶囊凝固过程液相率随时间变化曲线。顺流、逆流、横流的完全凝固时间分别为 1 459、1 329、1 447 s,逆流的完全凝固时间最短。相较于顺流,逆流的完全凝固时间缩短 8.9%。这是由于 HTF 顺流时,顶部空腔隔断了上部迎风面与 PCM 的接触,空腔的空气热阻削弱了顺流迎风面作用,使得迎风面的换热量较小。而 HTF 逆流时,PCM 始终与迎风侧直接接触,换热量较大。

2.3 流体温度对胶囊融化速度的影响

模拟了 548.15、553.15、558.15 K 3 种传热流体入口温度下 304 不锈钢相变胶囊、改性 PTFE 相变胶囊和 PTFE 相变胶囊的融化过程,其中 304 不锈钢胶囊的空腔在胶囊顶部,其余两种胶囊空腔在胶囊中心。HTF 逆流流动,入口速度为 0.1 m/s。

图 21 为不同 HTF 入口温度下相变胶囊的完全融化时间,从图 21 可以看到,提高 HTF 入口温度可

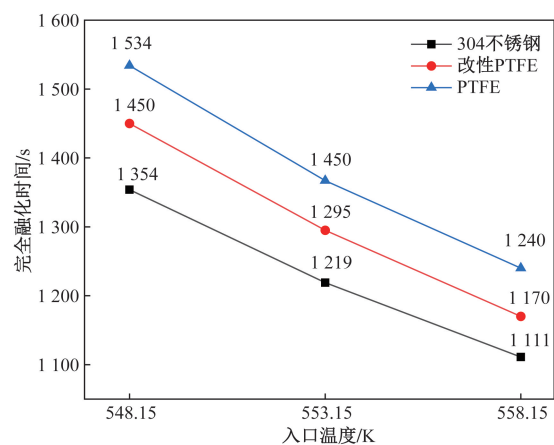


图 21 不同传热流体入口温度下相变胶囊完全融化时间

Fig. 21 Complete melting time of phase change capsules at different heat transfer fluid inlet temperatures

以大幅缩短相变胶囊的融化时间,当入口温度由 548.15 K 提升到 558.15 K 时,304 不锈钢、改性 PTFE、PTFE 3 种相变胶囊的完全融化时间分别缩短了 243、280、294 s,相对于 548.15 K 时的融化时间,558.15 K 时的融化速度分别提升了 17.9%、19.3%、19.2%。改性 PTFE、PTFE 胶囊与 304 不锈钢胶囊的完全融化时间的差值由 548.15 K 时的 96 s 与 200 s 变为 558.15 K 时的 59 s 与 129 s。因此从完全融化时间的角度分析,随着传热流体入口温度的升高,改性 PTFE、PTFE 相变胶囊与 304 不锈钢相变胶囊融化速度的差距在缩小。

图 22 为不同传热流体入口温度下相变胶囊的平均储热速率。如图 22 所示,提高 HTF 入口温度可以提高相变胶囊的平均储热速率。当 HTF 入口温度由 548.15 K 提高到 553.15 K 时,304 不锈钢、改性 PTFE、PTFE 3 种胶囊的平均储热速率分别提高了 5.07、4.97、4.66 J/s,当 HTF 入口温度由 553.15 K 提高到 558.15 K 时,3 种胶囊的平均储热速率分别提高了 5.26、4.9、4.58 J/s,304 不锈钢胶囊的平均储热速率的变化量随着 HTF 入口温度的升高而增加,其他两种胶囊的平均储热速率的变化量随 HTF 入口温度的升高而降低。因此,随着传热流体入口温度的降低,改性 PTFE、PTFE 胶囊与 304 不锈钢胶囊的平均储热速率的差距会越来越小,PTFE 胶囊应该在更小的传热温差下使用。已有研究证明与单级堆积床相比,梯级堆积床可以降低传热温差,提高储热量与焓效率,无论是从能量数量的角度还是能量品质的角度来看,梯级堆积床储热器均存在显著的优势。通过合理的设计梯级堆积床,降低平均传热温差,可以更好地发挥 PTFE 相变胶囊的优势。

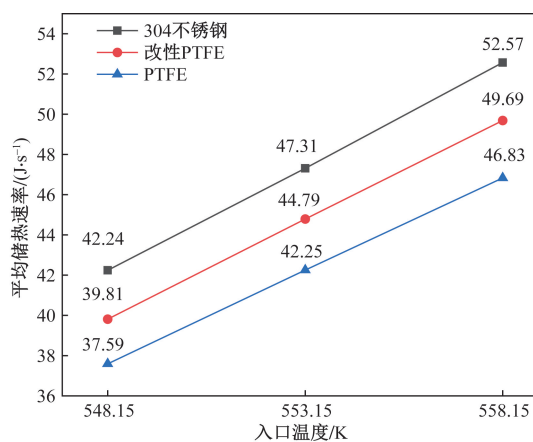


图 22 不同传热流体入口温度相变胶囊平均储热速率

Fig. 22 Average heat storage rate of phase change capsules with different heat transfer fluid inlet temperatures

2.4 流体速度对胶囊融化速度的影响

不同的传热流体入口速度会进一步影响相变胶囊的储热性能。本节模拟了 HTF 入口速度为 0.09、0.10、0.11 m/s 时 304 不锈钢相变胶囊、改性 PTFE 相变胶囊和 PTFE 相变胶囊的融化过程,其中 304 不锈钢胶囊空腔在胶囊顶部,其余两种胶囊空腔在胶囊中心。HTF 逆流流动,入口温度为 553.15 K。图 23 为不同传热流体入口速度相变胶囊的完全融化时间。从图 23 可以看到,提高 HTF 入口速度可以大幅缩短相变胶囊的融化时间,当 HTF 入口速度由 0.09 m/s 提升到 0.11 m/s 时,304 不锈钢、改性 PTFE、PTFE 三种相变胶囊的完全融化时间分别缩短了 144、126、128 s。改性 PTFE、PTFE 胶囊与 304 不锈钢胶囊的完全融化时间的差值在 HTF 入口速度为 0.09 m/s 时分别为 145 s 和 67 s,在 HTF 入口速度为 0.10 m/s 时分别为 149 s 和 77 s,在 HTF 入口速度为 0.11 m/s 时分别为 161 s 和 85 s。随着传热流体入口速度的升高,改性 PTFE、PTFE 胶囊与 304 不锈钢胶囊的完全融化时间的差距在增大。

图 24 为不同传热流体入口速度相变胶囊的平均储热速率。如图 24 所示,提高 HTF 入口速度可以提高相变胶囊的平均储热速率。HTF 入口速度由 0.09 m/s 提高到 0.10 m/s 时,304 不锈钢、改性 PTFE、PTFE 3 种胶囊的平均储热速率分别提高了 2.53、2.26、2.05 J/s,当 HTF 入口速度由 0.10 m/s 提高到 0.11 m/s 时,3 种胶囊的平均储热速率分别提高了 2.65、2.13、1.99 J/s。304 不锈钢胶囊的平均储热速率的变化量随着 HTF 入口速度的升高而增加,其余两种相变胶囊的平均储热速率的变化量随 HTF 入口速度的升高而降低。随着 HTF 入口速度的降低,改性 PTFE、PTFE 胶囊与 304 不锈钢胶囊的平均储热速率的差距会越来越小,因此 PTFE 胶

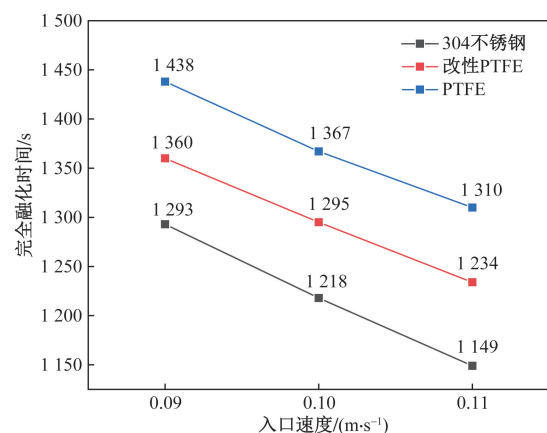


图 23 不同传热流体入口速度相变胶囊完全融化时间

Fig. 23 Complete melting time of phase change capsules with different heat transfer fluid inlet velocities

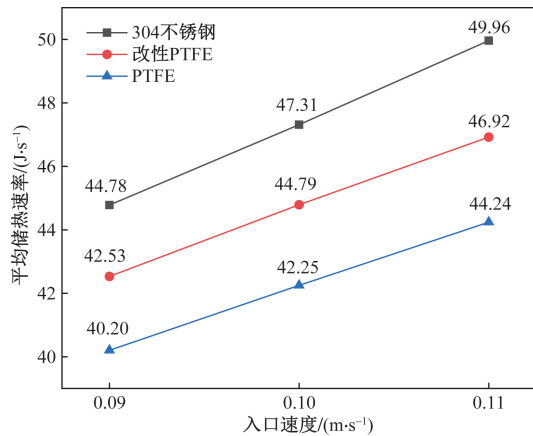


图 24 不同传热流体入口速度相变胶囊平均储热速率

Fig. 24 Average heat storage rate of phase change capsules with different heat transfer fluid inlet velocities

囊应该在更小的 HTF 流速下使用。已有研究证明^[23],提高堆积床 HTF 入口流速,可以缩短融化时间,提高平均储热速率,但是会降低堆积床的焓效率。

3 结论

建立了二维堆积床流动模型,研究了传热流体流动方向、流速、温度、胶囊直径对相变胶囊融化过程的影响,研究了传热流体流动方向对相变胶囊凝固过程的影响,得出如下结论。

(1)减小相变胶囊直径可以加快融化速度,当相变胶囊直径为 12 mm 时,PTFE 为壁材空腔在中心相变胶囊较 304 不锈钢相变胶囊融化速度慢 1.45%,平均储热速率低 1.5%。改性 PTFE 为壁材空腔在中心的相变胶囊较 304 不锈钢相变胶囊融化速度快 6.9%,平均储热速率高 5.8%。空腔在中心相变胶囊小直径时换热量更具优势。

(2)顺流、逆流、横流的完全凝固时间分别为 1 459、1 329、1 447 s,逆流的完全凝固时间最短。相较于顺流,逆流的完全凝固时间缩短 8.9%。这是由于 HTF 顺流时,顶部空腔隔断了上部迎风面与 PCM 的接触,空腔的空气热阻削弱了顺流迎风面作用,使得迎风面的换热量较小。而 HTF 逆流时,PCM 始终与迎风侧直接接触,换热量较大。

(3)提高 HTF 入口速度可以大幅缩短相变胶囊的融化时间,当 HTF 入口速度由 0.09 m/s 提升到 0.11 m/s 时,304 不锈钢、改性 PTFE、PTFE 3 种相变胶囊的完全融化时间分别缩短了 144、126、128 s。提高 HTF 入口温度可以提高相变胶囊的平均储热速率。当 HTF 入口温度由 548.15 K 提高到 553.15 K 时,304 不锈钢、改性 PTFE、PTFE 3 种胶囊的平均储热速率分别提高了 5.07、4.97、4.66 J/s。

参考文献

- [1] 陈俊旗,曹世豪.自然对流对方腔内相变石蜡熔化蓄热的影响[J].科学技术与工程,2022,22(24):10586-10593.
Chen Junqi, Cao Shihao. The effect of natural convection on the melting and heat storage of phase change paraffin in the cavity[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(24): 10586-10593.
- [2] Tian Z, Liao Z, Xu C, et al. Experimental and numerical investigation of the melting process of solar salt in a spherical capsule[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 74. DOI: 10.1016/j.est.2023.109388.
- [3] Bouzennada T, Mechighel F, Filali A, et al. Numerical investigation of heat transfer and melting process in a PCM capsule: effects of inner tube position and Stefan number[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 27. DOI: 10.1016/j.csite.2021.101306.
- [4] 刘永强.相变蓄热胶囊及其堆积蓄热特性的数值研究[D].吉林:东北电力大学,2018.
Liu Yongqiang. Numerical study on phase change heat storage capsule and its accumulation heat storage characteristics[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2018.
- [5] 陈哲.高温相变胶囊储热器传热性能分析[D].郑州:郑州大学,2020.
Chen Zhe. Analysis of heat transfer performance of high temperature phase change capsule heat storage[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.
- [6] Sun Y S, Xu J Y, Wang H J, et al. Effects of natural and Marangoni convections on melting of high-temperature encapsulated phase change material under the earth and the moon gravities[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 201. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117760.
- [7] 王凌皓,刘方.含球形相变胶囊的混合储能水箱特性模拟研究[J].科学技术与工程,2023,23(4):1534-1542.
Wang Linghao, Liu Fang. Simulation study on the characteristics of hybrid energy storage tank with spherical phase change capsules[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(4): 1534-1542.
- [8] Mao Q, Zhang Y, Zhao Y. Optimal design and heat transfer performance analysis of channels in spherical phase change capsules[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 90. DOI: 10.1016/j.est.2024.111975.
- [9] Avcı M, Yazıcı M Y. An experimental study on effect of inclination angle on the performance of a PCM-based flat-type heat sink[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 131: 806-814.
- [10] Khobragade S, Devanuri J K. Impact of inclination on the thermal performance of shell and tube latent heat storage system under simultaneous charging and discharging: numerical investigation[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 214. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118811.
- [11] Yoladı M, Akyurek E F, Afshari F. Experimental study on the influence of inclination angle on phase change materials and natural convection during melting[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 83. DOI: 10.1016/j.est.2024.110769.
- [12] 毛前军,郑婷.内翅式太阳能球形胶囊传热特性研究[J].科

- 学技术与工程, 2018, 18(3): 235-239.
- Mao Qianjun, Zheng Ting. Study on heat transfer characteristics of inner-wing solar spherical capsules[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(3): 235-239.
- [13] Karami R, Kamkari B. Investigation of the effect of inclination angle on the melting enhancement of phase change material in finned latent heat thermal storage units[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 146: 45-60.
- [14] Hong Y, Ye W B, Huang S M, et al. Thermal storage characteristics for rectangular cavity with partially active walls[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126: 683-702.
- [15] Yu D H, He Z Z. Shape-remodeled macrocapsule of phase change materials for thermal energy storage and thermal management[J]. Applied Energy, 2019, 247: 503-516.
- [16] Augspurger M, Becker J, Buchholz J, et al. Three-dimensional numerical and experimental investigation of the behavior of solar salts within thermal storage devices during phase change[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 143: 791-811.
- [17] Cheng Z D, He Y L, Xiao J, et al. Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics in the receiver tube of parabolic trough solar collector[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, 37(7): 782-787.
- [18] Assis E, Katsman L, Ziskind G, et al. Numerical and experimental study of melting in a spherical shell[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(9/10): 1790-1804.
- [19] 陶国良. 高导热先进复合材料设计制备及应用技术研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2006.
- Tao Guoliang. Research on design, preparation and application technology of advanced composite materials with high thermal conductivity[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2006.
- [20] Li M J, Jin B, Ma Z, et al. Experimental and numerical study on the performance of a new high-temperature packed-bed thermal energy storage system with macroencapsulation of molten salt phase change material[J]. Applied Energy, 2018, 221: 1-15.
- [21] Ashjaee M, Amiri S, Habibi K. Slot jet impingement heat transfer from an isothermal circular cylinder[C]//Second International Conference on Thermal Issues in Emerging Technologies. Cairo: EGYPT, 2008: 399-404.
- [22] 张仲彬, 朱长林, 孟雨欣. 相变胶囊无序堆积级联布置蓄热特性数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5634-5643.
- Zhang Zhongbin, Zhu Changlin, Meng Yuxin. Numerical analysis of heat storage characteristics of disordered stacking cascade arrangement of phase change capsules[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2021, 41(16): 5634-5643.
- [23] 孙岩松, 许锦阳, 洪芳军. 高温梯级相变胶囊堆积床储热系统数值研究[J]. 制冷技术, 2022, 42(6): 1-8.
- Sun Yansong, Xu Jinyang, Hong Fangjun. Numerical study of high temperature cascade phase change capsule packed bed heat storage system[J]. Refrigeration Technology, 2022, 42(6): 1-8.