

DOI: 10.19666/j.rlfed.202403057

# 基于内管移动的卧式管壳式相变储热器 储热性能优化研究

周少斌<sup>1</sup>, 曹红梅<sup>2</sup>, 付宁<sup>2</sup>, 张民<sup>3</sup>, 郭丰瑞<sup>3</sup>, 王晓龙<sup>3</sup>, 高明<sup>1</sup>

(1.山东大学能源与动力工程学院高效储能及氢能利用山东省工程研究中心, 山东 济南 250061;

2.华能山东发电有限公司, 山东 济南 250014;

3.华能国际发电有限公司日照电厂, 山东 日照 276800)

**[摘要]** 相变储热技术能够实现对固态储放氢过程热量的回收和供给, 实现固态储氢罐内的自热平衡, 提高储放氢性能。研究针对卧式管壳式相变储热器, 提出了一种新型的内管偏心放置绕中心轴线旋转的运动方式, 采用 Fluent 数值模拟软件, 基于动网格技术编写了用户自定义函数 UDF, 重点研究了内管偏心距离与旋转速度对储热性能的影响。结果表明: 与传统中心内管静止布置相比, 偏心内管的旋转运动能够显著提高储热性能, 当偏心距离为 9 mm, 旋转速度为 0.10 r/min 时, 储热时间达到最小值, 储热时间减少了 92.16%, 时间平均储热速率是内管静止布置的 11.51 倍; 当偏心距离为 9 mm, 旋转速度由 0.30 r/min 减少至 0.10 r/min 时, 储热时间减少了 13.57%; 当旋转速度为 0.10 r/min, 偏心距离由 3 mm 增至 9 mm 时, 储热时间减少了 70.48%。该研究结果可为卧式管壳式相变储热器在储氢领域的性能优化研究提供新思路。

**[关键词]** 卧式管壳式相变储热器; 固态储氢; 内管移动; 储热性能; 数值模拟

**[引用本文格式]** 周少斌, 曹红梅, 付宁, 等. 基于内管移动的卧式管壳式相变储热器储热性能优化研究[J]. 热力发电, 2024, 53(9): 109-117. ZHOU Shaobin, CAO Hongmei, FU Ning, et al. Optimization study on thermal storage performance of horizontal shell and tube latent heat thermal energy storage exchangers based on inner tube movement[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(9): 109-117.

## Optimization study on thermal storage performance of horizontal shell and tube latent heat thermal energy storage exchangers based on inner tube movement

ZHOU Shaobin<sup>1</sup>, CAO Hongmei<sup>2</sup>, FU Ning<sup>2</sup>, ZHANG Min<sup>3</sup>, GUO Fengrui<sup>3</sup>,  
WANG Xiaolong<sup>3</sup>, GAO Ming<sup>1</sup>

(1.Shandong Engineering Research Center for High-efficiency Energy Storage and Hydrogen Energy Utilization, School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2.Huaneng Shandong Power Generation Co., Ltd., Jinan 250014, China; 3.Huaneng International Power Co., Ltd. Rizhao Power Plant, Rizhao 276800, China)

**Abstract:** Latent heat thermal energy storage technology can realize recovery and supply of heat during solid-state hydrogen storage and release process, achieving self-thermal balance inside the solid-state hydrogen storage tank, and improve the hydrogen storage and release performance. For horizontal tube and shell latent heat thermal energy storage exchanger, a new movement method where the inner tube is placed eccentrically to rotate around the central axis is proposed. By the Fluent software, the user-defined function UDF is written using the dynamic mesh technique, and the influence of eccentric distance and rotation velocity of the inner tube on heat storage performance is focused. The results show that, compared with the conventional static arrangement of the central inner tube, the rotation movement of the eccentric inner tube can improve the heat storage performance

收稿日期: 2024-03-22

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ24-HF36); 山东省自然科学基金项目 (ZR2023ME025)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ24-HF36); Natural Science Foundation Project of Shandong Province (ZR2023ME025)

第一作者简介: 周少斌 (2000), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为相变储热技术, 202234585@mail.sdu.edu.cn.

通信作者简介: 高明 (1977), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高效储能及氢能利用技术, gm@sdu.edu.cn.

significantly. The heat storage time reaches the shortest when the eccentric distance is 9 mm and the rotation velocity is 0.10 r/min, namely decreases by 92.16%, and the time average heat storage rate increases by 11.51 times. The heat storage time reduces by 13.57% when the eccentric distance is 9 mm and the rotation velocity is decreased from 0.30 r/min to 0.1 r/min, it decreases by 70.48% when the rotation velocity is 0.10 r/min and the eccentric distance is increased from 3 mm to 9 mm. The study results can provide a new idea for performance optimization of horizontal shell and tube latent heat thermal energy storage exchangers in hydrogen storage field.

**Key words:** horizontal shell and tube latent heat thermal energy storage exchanger; solid-state hydrogen storage; inner tube movement; heat storage performance; numerical simulation

氢气作为一种能源载体,能够缓解可再生能源的间歇性和波动性问题<sup>[1-2]</sup>。氢能技术是未来我国长期发展的方向,氢气存储技术为氢能发挥战略意义提供支撑,是促进氢能技术快速发展的关键因素<sup>[3]</sup>。

在各种储氢方式中,金属氢化物(metal hydride, MH)储氢具有高体积储氢密度、高安全性等优点,具有巨大的应用价值<sup>[4]</sup>。但金属氢化物储氢技术在储氢过程中释放的热量被冷却液吸收后耗散到空气中,导致储氢能耗的增加,是其发展的主要瓶颈<sup>[5]</sup>。储热技术能够将储氢过程中 MH 释放的热量储存,并在放氢过程释放,实现储放氢过程中热量的循环利用<sup>[6]</sup>。其中,相变储热作为一种利用物质相变潜热进行热量存储和释放的技术,因其高储热密度、良好的稳定性等优点取得广泛应用<sup>[7-9]</sup>,利用相变材料(phase change material, PCM)对储氢过程进行热管理,能够解决金属氢化物储氢能耗增加的问题,达到节能减排的目的<sup>[10-12]</sup>。

PCM 固有的低导热性使其在储放热过程中的传热速率受到显著影响,针对相变储热技术的研究主要集中于相变材料和相变储热器两方面<sup>[13-14]</sup>。在相变储热器强化方面,根据是否需要额外消耗能量分为主动和被动强化方式,众多学者针对主动强化方式提出了相应的措施,并开展相关研究。Fathi 和 Kurnia 等人<sup>[15-16]</sup>针对光滑内管旋转, Soltani 等人<sup>[17]</sup>针对带有矩形翅片的内管旋转,分别研究了对 PCM 储放热过程的影响,证明光滑内管在中心位置处的自转仅能够促进紧邻内管处 PCM 的流动,矩形翅片内管旋转强化效果优于光滑内管。Li 等人<sup>[18]</sup>提出了一种具有可移动光滑内管的卧式相变储热器,发现内管在储热器内的移动能够显著强化储热过程,储热时间减少了 78.88%。Dai 等人<sup>[19]</sup>针对立式储热器提出了一种翻转方式,通过改变固液两相 PCM 的位置提高了储放热效果,储放热总时间减少了 14.93%。Farahani 等人<sup>[20]</sup>提出了一种带有振动圆柱体的板式储热器,结果显示通过振动圆柱使储热时间减少 12.84%。Xu 等人<sup>[21]</sup>研究了磁场对相变材料储

热过程的影响,发现磁场方向的改变会对熔化过程产生抑制作用。Choi 等人<sup>[22-23]</sup>研究了气泡驱动对储放热过程的影响,发现强化作用使储放热时间分别减少了 40% 和 12%。

综上所述,目前关于相变储热器主动强化的研究考虑了光滑和翅片内管旋转、内管平移等多种方式,而未考虑偏心放置的光滑内管绕中心轴线旋转的方式。为进一步探究偏心内管的旋转运动对卧式管壳式相变储热器储热性能的强化效果,本文采用数值模拟方法,建立了相变储热器的二维数值计算模型,研究了内管偏心放置绕中心轴线旋转对储热过程的影响,以期获得内管移动优化方案。

## 1 物理模型

本文采用卧式相变储热器结构如图 1 所示。换热流体在管侧流动,PCM 放置于壳侧,储热器材料为铜,PCM 为石蜡材料 RT35<sup>[24]</sup>,物性参数见表 1。内管半径  $r_1=19$  mm,管壁厚度  $d=1$  mm,外管半径  $r_2=50$  mm,忽略外管厚度,储热器长度  $L=500$  mm。内管偏心放置时,内管偏心距离  $e$  为内管底部与外管圆心的距离。

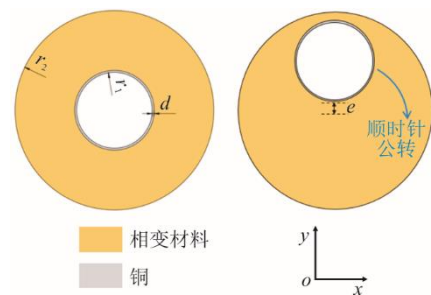


图 1 卧式相变储热器结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of the horizontal latent heat thermal energy storage exchanger

本文利用动网格技术实现网格运动,采用网格光顺和重构方法实现网格的更新并通过用户自定义函数(UDF)确定内管旋转方向和旋转速度,实现内管绕中心轴线的公转运动。设置 5 个内管旋转速度,分

别为 0.05、0.10、0.20、0.30、0.40 r/min；4 个内管偏心距离，分别为 3、5、7、9 mm。

表 1 铜和 RT35 的热物性参数  
Tab.1 Thermophysical properties of copper and RT35

参数	铜	RT35
凝固、熔化温度/K		302.15/309.15
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	8 960	860 (固体) /770 (液体)
比热容/(J·(kg·K) <sup>-1</sup> )	400	2 000
相变潜热/(J·kg <sup>-1</sup> )		170 000
热导率/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	385	0.2
热膨胀系数/K <sup>-1</sup>		0.000 6
动量黏度/(kg·(m·s) <sup>-1</sup> )		0.023

为保证旋转顺利进行，初始时刻保持内管静止 10 s，使贴近内管的 PCM 熔化为液态后开始旋转。利用最大转速 0.4 r/min 在偏心距离为 9 mm 旋转过程中，内管与液相分数为 0.001 界面之间的位置判断内管与固态 PCM 是否接触。储热时间 10、50、100、150 s 时内管与液相分数为 0.001 界面位置如图 2 所示。由图 2 可知，内管外壁面与液相分数为 0.001 界面始终保持一定距离。这意味着内管在绕储热器外壳中心轴线的旋转过程中，壁面附近的固态 PCM 始终为液态，能够正常进行旋转运动。

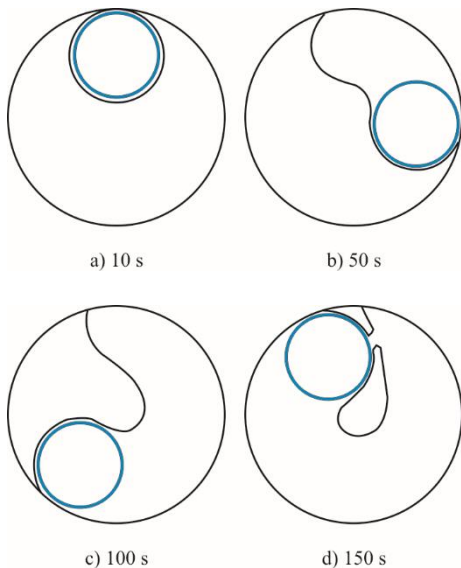


图 2 内管与液相分数 0.001 界面位置关系

Fig.2 Position relationship between the inner tube and the liquid fraction 0.001 interface

## 2 数学模型

### 2.1 控制方程

采用 Fluent 数值计算软件中的凝固-熔化模型

求解相变过程。凝固-熔化模型基于焓-孔隙率方法，PCM 区域被视为多孔介质，使用孔隙率表示单元网格的液相分数。为简化计算过程，采用相关假设<sup>[25-26]</sup>如下：

1) PCM 的流动为二维、瞬态、层流和牛顿不可压缩流体；

2) PCM 的热物性参数稳定且不随温度变化；对于动量方程浮升力项中的密度变化，采用 Boussinesq 假设；

3) 忽略 PCM 在相变过程中的体积变化；

4) 忽略 PCM 在相变过程中的黏性耗散。

通过假设，控制方程如下<sup>[27-28]</sup>。

1) 连续性方程

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

2) 动量方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + Au \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + Av + \rho g \alpha (T - T_{ref}) \quad (3)$$

式中： $\rho$ 为 PCM 的密度，kg/m<sup>3</sup>； $\mu$ 为动量黏度，kg/(m·s)； $g$ 为标准重力加速度，m/s<sup>2</sup>； $\alpha$ 为热膨胀系数，K<sup>-1</sup>； $T_{ref}$ 为参考温度，K； $T$ 为单元网格内 PCM 的平均温度，K； $Au$ 和  $Av$ 为动量源项，作用是控制 PCM 的速度； $A$ 为孔隙率函数，表示对 PCM 速度阻尼作用，如方程(4)所示。

$$A = -C \frac{(1 - \beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon} \quad (4)$$

式中： $C$ 为糊状区域常数，该值会对 PCM 的相变过程产生影响，取值范围是 10<sup>4</sup>~10<sup>7</sup><sup>[29-31]</sup>，本文取值为 10<sup>5</sup>； $\beta$ 表示局部液相分数，如方程(5)所示；常数 $\varepsilon$ 为极小数 0.001，避免当液相分数 $\beta$ 为 0 时，分母为 0。

$$\beta = \begin{cases} 0 & T \leq T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l \\ 1 & T \geq T_l \end{cases} \quad (5)$$

式中： $T_s$ 和  $T_l$ 为 PCM 的固相和液相温度，K。

3) 能量方程

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S_n \quad (6)$$

式中： $k$ 为PCM的导热系数， $W/(m \cdot K)$ ； $h$ 为PCM的焓， $J$ ，如方程(7)所示； $S_n$ 为能量源项，如方程(8)所示。

$$h = \begin{cases} \int_{T_{ref}}^T c_p dT & T \leq T_s \\ \int_{T_{ref}}^{T_s} c_p dT + \beta \Delta H & T_s < T < T_1 \\ \int_{T_{ref}}^{T_s} c_p dT + \beta \Delta H + \int_{T_1}^T c_p dT & T \geq T_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中： $c_p$ 为定压比热容， $J/(kg \cdot K)$ ； $\Delta H$ 为PCM的相变潜热， $J/kg$ 。

$$S_n = -\rho \Delta H \frac{\partial \beta}{\partial t} \quad (8)$$

## 2.2 初始和边界条件

储热器初始温度  $T_0=298.15$  K，此时PCM均为固态。内管内壁面为定温边界条件，温度  $T_{wall}=338.15$  K，内管外壁面为耦合边界条件，外管为绝热边界条件，数学描述如下。

1) 初始温度条件

$$t = 0, T(x, y) = T_0 = 298.15 \text{ K} \quad (9)$$

2) 定温边界条件

$$T(x, y) = T_{wall} = 338.15 \text{ K} \quad (10)$$

3) 耦合边界条件

$$u = v = 0, T_s = T_{PCM} \quad (11)$$

$$-k_s \left( x \frac{\partial T_s}{\partial x} + y \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) = -k_{PCM} \left( x \frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} + y \frac{\partial T_{PCM}}{\partial y} \right) \quad (12)$$

4) 绝热边界条件

$$\frac{\partial T(x, y)}{\partial n} = 0 \quad (13)$$

## 2.3 模型验证

### 2.3.1 网格数和时间步长独立性验证

采用中心内管静止布置工况进行网格数和时间步长独立性验证，数值计算结果如图3所示。所选择的网格数分别为6997、17383、69452和107110，当网格数由69452增加至107110时，储热时间的相对误差为1.44%。选择时间步长为0.005、0.010、0.050、0.100 s，当时间步长由0.010 s降至0.005 s时，储热时间的相对误差为0.03%。因此，考虑计算时间和准确性，所选择的网格数和时间步长分别为69452和0.010 s。

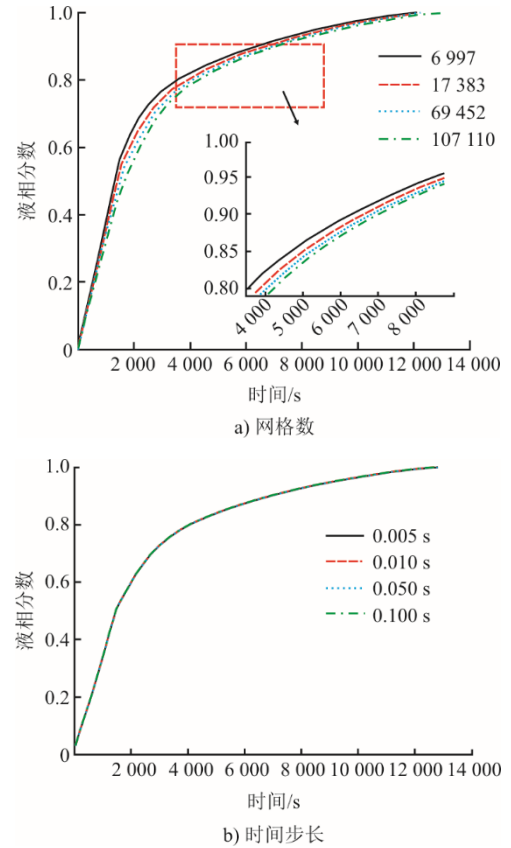


图3 网格数和时间步长独立性验证

Fig.3 Independence validation of grid number and time step

### 2.3.2 模型验证

为了验证本文计算方法的正确性，采用相同的计算方法，将模拟结果与A.A.Al-Abidi等人<sup>[32]</sup>实验和数值计算结果进行对比，PCM的平均温度变化如图4所示。数值计算与实验结果之间的最大相对误差小于3%，验证了本文计算方法的准确性。

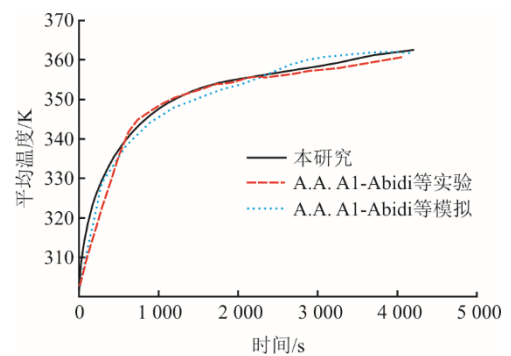


图4 模拟与实验结果比较

Fig.4 Comparison between the numerical calculation and the experimental results

## 3 结果与讨论

通过建立相变储热器二维数值计算模型，研究相变储热器内管偏心放置并绕中心轴线旋转对储

热过程的强化作用，分析不同内管偏心距离和旋转速度下相变储热器的储热性能，获得优化内管旋转运动方案。

### 3.1 偏心内管旋转对储热过程的影响

当中心内管静止布置时，储热时间为 12 783.3 s。表 2 为不同偏心距离和旋转速度的储热时间。由表 2 可见，当内管旋转速度和偏心距离分别为 0.10 r/min 和 9 mm 时，最短储热时间为 1 002.2 s，与传统的中心内管静止布置相比，储热时间减少了 92.16%，强化效果显著。

表 2 不同偏心距离和旋转速度的储热时间 单位: s  
Tab.2 Heat storage time under conditions with different eccentric distances and rotation velocities

旋转速度/(r·min <sup>-1</sup> )	偏心距离/mm			
	3	5	7	9
0.05	3 700.1	2 977.7	1 894.0	1 004.2
0.10	3 395.5	2 589	1 736.3	1 002.2
0.20	3 167.8	2 360.3	1 617.1	1 134.2
0.30	3 042.1	2 268.4	1 476.5	1 159.5
0.40	2 931.9	2 169.4	1 351.9	1 146.5

储热量  $Q$  和时间平均储热速率  $\bar{q}$  计算公式为:

$$Q = c_p m (T_2 - T_0) + \beta \Delta H \quad (14)$$

$$\bar{q} = \frac{Q}{t} \quad (15)$$

式中:  $m$  为储热器 PCM 质量, kg;  $T_2$  为储热过程完成时 PCM 的平均温度, K;  $t$  为储热时间, s。

图 5 为不同工况储热量  $Q$  和时间平均储热速率  $\bar{q}$ 。由图 5a)可知,传统中心内管静止布置储热量  $Q=647.8$  kJ,部分旋转速度和偏心距离条件下,偏心旋转运动具有更大的储热量。这是由于随着旋转速度的增大,内管与 PCM 之间的换热时间减少,使 PCM 的平均温度降低,储热量减少。内管偏心距离和旋转速度分别为 5 mm 和 0.40 r/min 时,储热量具有最大值 671.76 kJ,与传统的中心内管静止布置相比,增大了 3.7%。由图 5 b)可知,传统中心内管静止布置时间平均储热速率  $\bar{q}=50.68$  W,旋转运动提高了储热过程的时间平均储热速率,当内管偏心距离和旋转速度为 9 mm 和 0.10 r/min 时,时间平均储热速率具有最大值 583.1 W,是中心内管静止状态下的 11.51 倍。

### 3.2 内管旋转速度对储热过程的影响

由表 2 可知,当内管偏心距离为 3、5、7 mm 时,储热时间随旋转速度的增加而减小,当偏心距离为 9 mm 时,储热时间随旋转速度总体上呈现先

增大后减小的趋势。对偏心距离为 9 mm 时,不同旋转速度对储热过程的影响进行分析。

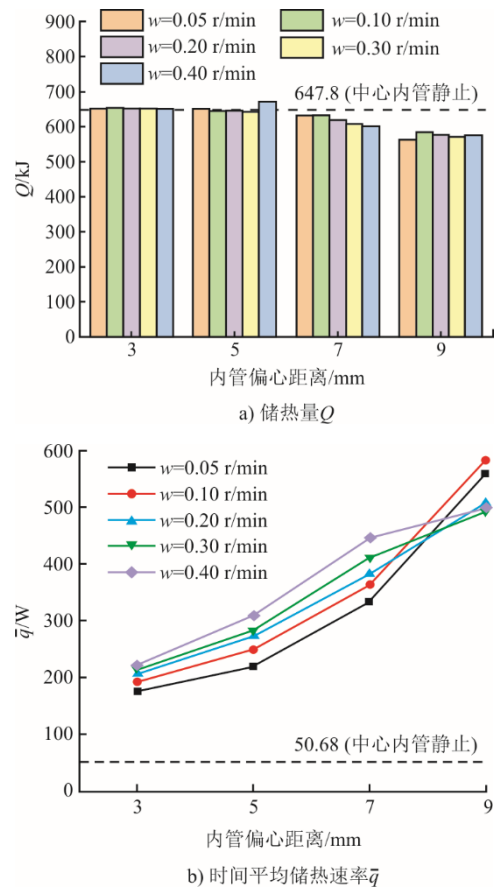


图 5 不同工况储热量  $Q$  和时间平均储热速率  $\bar{q}$   
Fig.5 Heat storage capacity  $Q$  and time average heat storage rate  $\bar{q}$  under different conditions

图 6 为内管偏心距离 9 mm 时不同旋转速度液相分数和储热量  $Q$ 。由图 6a)可知,随旋转速度提高,液相分数曲线斜率增大,不同曲线间的间距减小。液相分数曲线斜率随储热过程进行呈现减小的趋势,斜率首次降低的时间随旋转速度的增加而减小,分别是 919.0、512.9、287.4、212.7、182.1 s。各旋转速度对应的曲线斜率均产生波动,波动次数随旋转速度的提高而显著增加。这主要是由于随着转速的提高,内管热壁面与固态 PCM 之间位置的变化频繁,较小的传热热阻使得曲线斜率显著增大。在偏心距离固定为 9 mm 时,与旋转速度 0.30 r/min 相比,旋转速度 0.10 r/min 时的储热时间减少 13.57%。

由图 6b)可知,在旋转速度为 0.10 r/min 的储热过程完成时,不同旋转速度之间的潜热储热量差距较小。在偏心距离固定为 9 mm 时,与旋转速度为 0.30 r/min 相比,0.10 r/min 的显热和潜热储热量分别提高了 31.01%和 0.57%,强化效果显著。

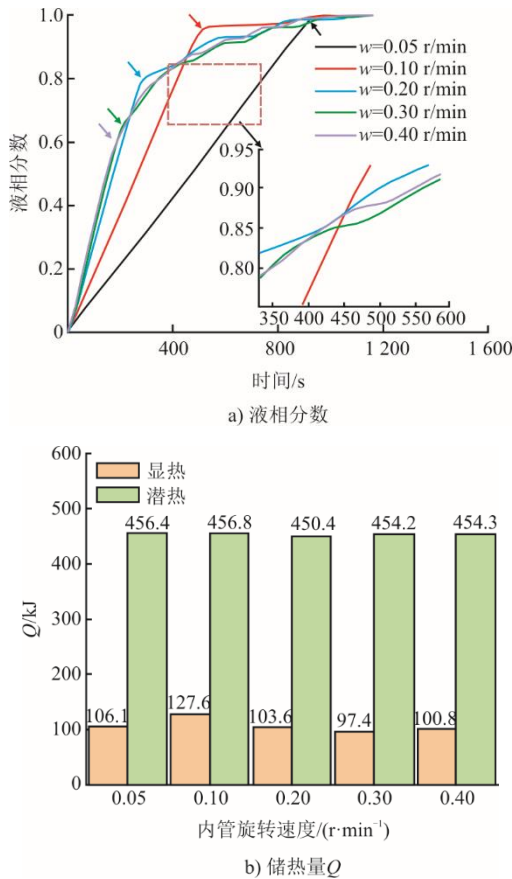


图 6 偏心距离 9 mm 时不同旋转速度液相分数和储热量 Q  
Fig.6 Liquid fraction and heat storage capacity Q at different rotation velocities for eccentric distance of 9 mm

图 7 为偏心距离 9 mm, 旋转速度分别为 0.10、0.30 r/min 在储热时间为 200 和 400 s 时的液相分布云图。

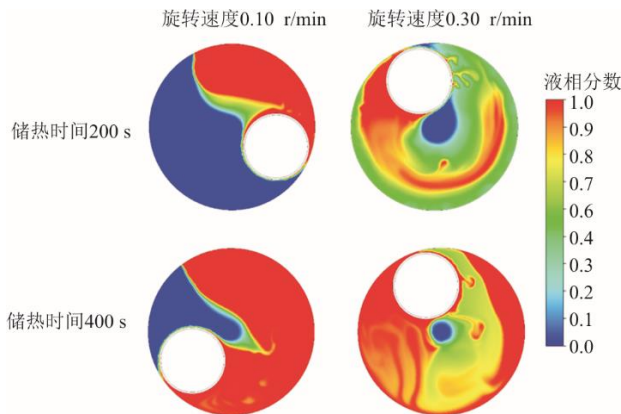


图 7 偏心距离 9 mm 时旋转速度 0.10、0.30 r/min 在储热时间为 200 s 和 400 s 时的液相分布云图  
Fig.7 Liquid fraction contour at rotation velocities 0.10 r/min and 0.30 r/min with eccentric distance of 9 mm for heat storage time of 200 s and 400 s

由图 7 可见, 在相同时间内, 较大的旋转速度使内管掠过更大的面积, 内管在确定位置处的停留

时间减小, 导致内管掠过的部分处于固-液共存状态, 此时固-液共存区域的液相分数为 0~1, 暂未完全熔化。由于此时内管偏心距离为 9 mm, 紧邻外壳附近的固态 PCM 熔化效果较好, 并无显著的固-液共存区域。在内管移动过程, 熔化死区位置始终位于壁面移动方向的前端, 与内管壁面的距离不断减小, 直至 PCM 完全熔化。

图 8 为偏心距离等于 9 mm 时, 旋转速度分别为 0.10、0.30 r/min 在储热时间为 200 s 和 400 s 时的温度云图。由图 8 可见, 较快的旋转速度使内管在旋转过程经过位置的平均温度较低, 储热器上部由于受到自然对流的影响, 平均温度显著大于底部位置且水平方向的温度梯度较大, 不利于储热器水平方向的热量传递, 导致水平方向热量分布不均匀。

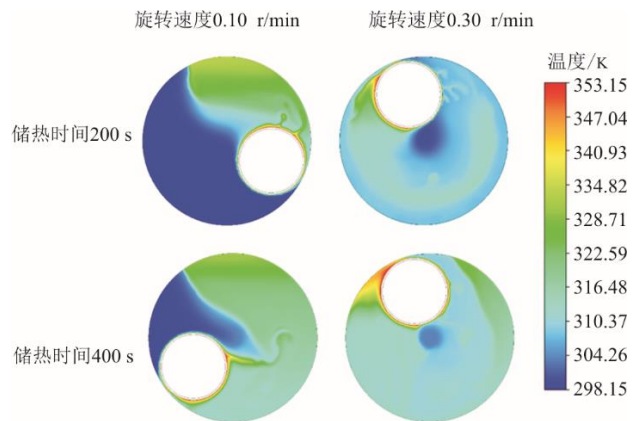


图 8 偏心距离 9 mm 时旋转速度 0.10、0.30 r/min 在储热时间为 200 s 和 400s 的温度云图

Fig.8 Temperature contour at rotation velocities 0.10 r/min and 0.30 r/min for eccentric distance of 9 mm for heat storage time of 200 s and 400 s

### 3.3 内管偏心距离对储热过程的影响

由表 2 可知, 旋转速度确定时, 储热时间随着偏心距离的增大而减小。本节对旋转速度为 0.10 r/min 时, 内管偏心距离对储热过程的影响进行分析。旋转速度为 0.10 r/min 时, 不同偏心距离的液相分数和储热量 Q 如图 9 所示。由图 9a)可知, 随着偏心距离的增大, 液相分数曲线斜率增加。由于内管移动过程中与 PCM 之间的传热热阻改变, 使得液相分数曲线斜率在储热过程中产生波动。在旋转速度固定为 0.10 r/min 时, 储热时间在偏心距离 9 mm 时为最小值, 与偏心距离为 3 mm 相比, 储热时间减少了 70.48%。在旋转速度和内管偏心距离分别为 0.10 r/min 和 9 mm 工况下具有最短储热时间。此时, 偏心距离为 9 mm 的显热和潜热储热量分别为 127.6、

456.8 kJ，与偏心距离为 3 mm 相比，显热和潜热储热量分别提高 24.12% 和 11.39%。

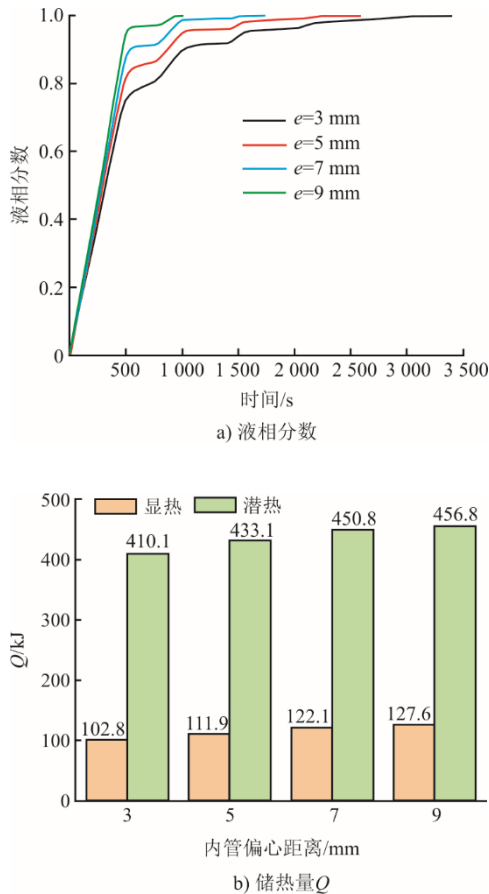


图 9 旋转速度 0.10 r/min 时不同偏心距离的液相分数和储热量 Q

Fig.9 Liquid fraction and heat storage capacity Q for different eccentric distances at rotation velocity of 0.10 r/min

内管旋转速度 0.10 r/min 时不同偏心距离的壁面热流曲线如图 10 所示。随着内管偏心距离的增大，壁面热流提高。储热过程开始时，内管与紧邻壁面的固态 PCM 之间具有最大换热温差，此时换热效果最好；随着 PCM 由固态逐渐熔化为液态，内管与 PCM 之间的换热热阻逐渐增大，壁面热流显著降低。旋转运动开始后，内管与固态 PCM 间的距离随旋转运动而减小，导致换热热阻减小，壁面热流进一步提高；随着储热过程进行，PCM 液相分数和平均温度逐渐提高，内壁面温度不变时，内管移动过程中与 PCM 间的换热温差减小，使得壁面热流的波动幅值逐渐降低。

图 11 为储热时间 400 s 时旋转速度和偏心距离为 0.10 r/min 和 9 mm 的速度矢量。由图 11 可知，储热过程开始后，内管壁面附近 PCM 具有较大的流动速度，使得此处的换热效果较好。内管移动方

向前端，PCM 的流动方向与内管移动的方向相反，使前端位置处的液相 PCM 向后方流动；后端位置处，PCM 的流动方向与内管移动方向相同。在内管已掠过的区域，液相 PCM 位置处产生了显著的涡流现象，可能的原因是此位置处 PCM 的温差较大，涡流会影响换热效果，降低涡流区域的传热速率。

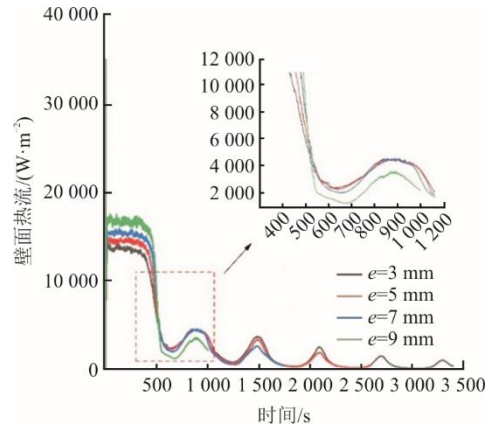


图 10 旋转速度 0.1 r/min 时不同偏心距离的壁面热流曲线  
Fig.10 Wall heat flux curves at different eccentric distances for rotation velocity of 0.1 r/min

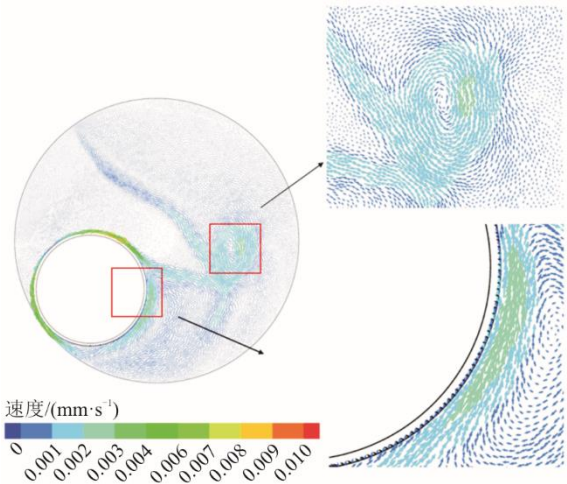


图 11 储热时间 400 s 时旋转速度和偏心距离为 0.10 r/min 和 9 mm 的速度矢量

Fig.11 Velocity vectors for rotation velocity and eccentric distance of 0.10 r/min and 9 mm with heat storage time of 400 s

### 4 结 论

本文提出了一种适用于卧式管壳式相变储热器的新型内管偏心放置绕中心轴线旋转的运动方式，通过数值模拟方法分别研究了内管旋转速度和偏心距离对储热过程的影响，主要结论如下。

1) 与传统中心内管静止布置相比，采用偏心内管旋转方式能够显著提高卧式管壳式相变储热

器的储热性能,当内管旋转速度为 0.10 r/min,偏心距离为 9 mm 时具有最短储热时间 1 002.2 s,储热时间减少了 92.16%;时间平均储热速率具有最大值 583.1 W,是中心内管静止状态下的 11.51 倍。

2) 内管偏心距离固定时,卧式管壳式相变储热器的储热时间随旋转速度的变化情况复杂。当偏心距离为 9 mm,旋转速度由 0.30 r/min 减至 0.10 r/min 时,储热时间减少了 13.57%,显热和潜热储热量分别提高了 31.01%和 0.57%。

3) 内管旋转速度固定时,卧式管壳式相变储热器的储热时间随内管偏心距离的增大而减小,当旋转速度为 0.10 r/min,偏心距离由 3 mm 增至 9 mm 时,储热时间减少了 70.48%,显热和潜热储热量分别提高了 24.12%和 11.39%。

#### [参考文献]

- [1] 曾升,李进,王鑫,等. 中国氢能利用技术进展及前景展望[J]. 电源技术, 2022, 46(7): 716-722.  
ZENG Sheng, LI Jin, WANG Xin, et al. Progress and prospect of hydrogen energy utilization technology in China[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(7): 716-722.
- [2] 杨凯鹏. 氢能技术现状及其在储能发电领域的应用[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(7): 157-159.  
YANG Kaipeng. Current situation of hydrogen energy technology and its application in the field of energy storage and power generation[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2023, 49(7): 157-159.
- [3] 何青,孟照鑫,沈轶,等. “双碳”目标下我国氢能政策分析与思考[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 27-36.  
HE Qing, MENG Zhaoxin, SHEN Yi, et al. Analysis and thinking of hydrogen energy policies in China under “double carbon” target[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 27-36.
- [4] KUMAR A, MUTHUKUMAR P, SHARMA P, et al. Absorption based solid state hydrogen storage system: A review[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 52: 102204.
- [5] SREERAJ R, AADHITHIYAN A K, ANBARASU S. Integration of thermal augmentation methods in hydride beds for metal hydride based hydrogen storage systems: Review and recommendation[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 52: 1-21.
- [6] LIU Y X, HE Q, SHI X P, et al. Energy storage in China: development progress and business model[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108240.
- [7] 宋颖芸,杨兆晟,张群力,等. 新型复合相变材料蓄热电暖器热性能实验研究[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 78-83.  
SONG Yingyun, YANG Zhaosheng, ZHANG Qunli, et al. Experimental research on thermal performance of electric heater using a new composite phase change material for thermal storage[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 78-83.
- [8] LI Z, LU Y J, HUANG R, et al. Applications and technological challenges for heat recovery, storage and utilisation with latent thermal energy storage[J]. Applied Energy, 2021, 283: 116277.
- [9] 毛发,章学来,丁磊,等. 热管式相变储能系统蓄/放热性能试验[J]. 热力发电, 2016, 45(11): 48-53.  
MAO Fa, ZHANG Xuelai, DING Lei, et al. Experimental research on heat charging and discharging performance of heat pipe phase change energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(11): 48-53.
- [10] ALQAHTANI T, MELLOULI S, BAMASAG A, et al. Thermal performance analysis of a metal hydride reactor encircled by a phase change material sandwich bed[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(11): 23076-23092.
- [11] 尧兢,朱鹏飞,任佳伟,等. 耦合相变储热的金属氢化物反应器吸氢过程模拟[J]. 过程工程学报, 2018, 18(5): 1093-1101.  
YAO Jing, ZHU Pengfei, REN Jiawei, et al. Simulation on hydrogen absorption process of metal hydride based hydrogen storage reactor coupled with phase-change thermal storage[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2018, 18(5): 1093-1101.
- [12] HASSAN I A, MOHAMMED R H, RAMADAN H S, et al. Performance evaluation of a novel concentric metal hydride reactor assisted with phase change material[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 224: 120065.
- [13] 张春伟,陈静,王成刚,等. 相变储能技术的传热强化方法综述[J]. 制冷学报, 2023, 44(1): 1-13.  
ZHANG Chunwei, CHEN Jing, WANG Chenggang, et al. Review on heat transfer enhancement methods of latent heat storage technology[J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(1): 1-13.
- [14] 李国俭. 相变储能材料开发与封装技术研究进展[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 23-31.  
LI Guojian. Progress in development and encapsulation of phase change energy storage materials[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 23-31.
- [15] FATHI M I, MUSSA M A. Experimental study on the effect of tube rotation on performance of horizontal shell and tube latent heat energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39: 102626.
- [16] KURNIA J C, SASMITO A P, PING S I. Investigation of heat transfer on a rotating latent heat energy storage[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 4173-4178.
- [17] SOLTANI H, SOLTANI M, KARIMI H, et al. Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage unit using a combination of fins and rotational mechanisms[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 179: 121667.
- [18] LI H T, DAI H, ZHOU S B, et al. Influence of movable inner tube on the charging performance for a horizontal latent thermal energy storage exchanger[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 76: 109831.
- [19] DAI H, ZHOU S B, NIU P P, et al. Numerical investigations of the effect of the flip method on charging/discharging performance of a vertical shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73: 108976.
- [20] FARAHANI S D, MOHAMMADI S, FARAHANI A D, et al. Control of the melting process in a rectangular energy storage chamber filled with phase change material in the presence of an oscillating and rotating cylinder[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 60: 106628.
- [21] XU W B, HUANG T J, HUANG S M, et al. Regulation mechanism of magnetic field on non-Newtonian melting and energy storage performance of metal foam composite

- nano-enhanced phase change materials[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 200: 123501.
- [22] CHOI S H, KO H S, SOHN D K. Bubble-driven flow enhancement of heat discharge of latent heat thermal energy storage[J]. *Energy*, 2022, 244(Part B): 123168.
- [23] CHOI S H, SOHN D K, KO H S. Heat transfer enhancement of latent heat thermal energy storage with nanoparticle by bubble-driven flow[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 231: 120922.
- [24] DAI H, WANG Y H, WANG N N, et al. Simulation study on charging performance of the latent energy storage heat exchanger with a novel conical inner tube[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 56(Part B): 106006.
- [25] 王刚, 白龙, 姜铁骝. 传热介质参数对相变胶囊储热罐蓄热性能与力学性能的影响分析[J]. *热力发电*, 2023, 52(5): 62-71.  
WANG Gang, BAI Long, JIANG Tieliu. Effect analysis of heat transfer fluid parameters on charging and mechanical performance of TES tank using PCM capsules[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(5): 62-71.
- [26] DAI H, ZHOU S B, LI X F, et al. Charging and discharging performances investigation for a vertical triplex-tube heat exchanger with a tapered configuration and reverse layout[J]. *Renewable Energy*, 2024, 222: 119976.
- [27] 韩中合, 王晓帅. 弓形截面柱状相变储热装置热性能数值模拟[J]. *热力发电*, 2022, 51(3): 29-35.  
HAN Zhonghe, WANG Xiaoshuai. Numerical study on thermal performance of cylindrical phase change heat storage device with bow section[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(3): 29-35.
- [28] 王刚, 庞仕承, 姜铁骝. 环形翅片对用于太阳能光热电站的相变储热罐蓄热性能的影响[J]. *热力发电*, 2023, 52(2): 39-45.  
WANG Gang, PANG Shicheng, JIANG Tieliu. Effect of annular heat transfer fin on charging performance of heat storage tank using phase change material for solar thermal power plants[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(2): 39-45.
- [29] LI H T, WANG N N, HE S Y, et al. Effect of inner-tube spacing on charging and discharging performance of latent energy storage heat exchangers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 216: 119112.
- [30] 顾煜炯, 张晨, 耿直, 等. 新型套管式相变蓄热器结构优化及传热研究[J]. *热力发电*, 2018, 47(1): 33-37.  
GU Yujiong, ZHANG Chen, GENG Zhi, et al. Structure optimization and heat transfer research for new type casing phase change heat sequencer[J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(1): 33-37.
- [31] ZHOU S B, DAI H, GAO M, et al. Influence of inner tube shapes on the charging and discharging performance for the latent heat thermal storage exchangers[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 154: 107466.
- [32] AL-ABIDI A A, MAT S, SOPIAN K, 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.

(责任编辑 杨嘉蕾)