

旋转机制对三管储能系统凝固特性影响的数值研究

王凡^{1,2}, 杜昭^{1,2}, 阳康^{1,2}, 黄昕宇², 郭俊菲², 杨肖虎²

(1. 中国建筑西北设计研究院有限公司, 710061, 西安;

2. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了提高三管潜热储能系统的凝固性能, 本文将旋转机制应用到其凝固过程中并开展了相应的数值模拟研究。通过实验数据对数值模型的准确性进行了验证, 深入探究了旋转对放热过程液相分布、温度分布和流速分布的影响; 对比分析了无旋转状态和不同转速下, 三管潜热储能系统凝固放热过程的液相演化、热能释放总量及热能释放速率。研究结果表明: 旋转机制的加入能有效地降低相变材料凝固时间且增大热能释放速率, 但在单个凝固周期内总热能释放量略有降低; 相比于静置状态, 0.50 r/min 转速下相变材料凝固时间缩短了 78.10%, 该转速下的热量释放速率是静止状态的 4.45 倍, 但总热能释放量降低了 2.52%。本文研究结果为旋转机制在三管潜热储能系统中的设计和应用提供了参考。

关键词: 三管潜热储能系统; 潜热储能; 旋转; 数值模拟; 凝固性能

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202302002 **文章编号:** 0253-987X(2023)02-0012-09

Numerical Study on the Effect of Rotation Mechanism upon Solidification Characteristics of a Triplex-Tube Thermal Energy Storage System

WANG Fan^{1,2}, DU Zhao^{1,2}, YANG Kang^{1,2}, HUANG Xinyu², GUO Junfei², YANG Xiaohu²

(1. China Northwest Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710061, China;

2. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the solidification performance of triplex-tube thermal energy storage system, the rotation mechanism is applied to the solidification process and a corresponding numerical simulation is carried out in this paper. The accuracy of numerical models is verified by comparing with experimental data and the influences of rotation on the liquid phase distribution, temperature distribution, and flow velocity field in the exothermic process are explored. The liquid phase evolution, total amount of heat energy release, and heat energy release rate of the triplex-tube thermal energy storage system without rotation and at different rotational speeds are compared and analyzed. The results demonstrate that the application of rotation effectively reduces the solidification time and increases the heat release rate of the system, but the total heat release decreases slightly in individual solidification cycles. The solidification time of phase change materials at 0.5 r/min is reduced by 78.1% compared with that under static state, while the heat release rate

收稿日期: 2022-06-10。 作者简介: 王凡(1982—), 男, 高级工程师; 杨肖虎(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51976155)。

网络出版时间: 2022-11-07

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20221104.1600.007.html>

is 4.45 times that under static state. However, the total heat release decreases by 2.52%. The research provides guidance for the design and application of rotation mechanism in triplex-tube thermal energy storage system.

Keywords: triplex-tube thermal energy storage system; latent heat energy storage; rotation mechanism; numerical simulation; solidification performance

随着国家“双碳”目标任务的推进,现有能源结构正在发生深刻变化。以化石能源为主的能源结构正在朝着低碳化变革,可再生能源供给比例不断加大^[1]。以风能、太阳能为代表的可再生能源存在间歇性与不稳定的缺点^[2]。储能技术的发展可有效解决这一问题,提供能源稳定输出,是新能源发展的核心支撑^[3]。在众多储能技术中,热能存储是最具应用前景的储能技术之一^[4-5]。其中潜热热能存储技术(LHTES)因其单位质量(体积)蓄热量大、温度波动小(储存和释放过程近似等温)、具有良好的化学稳定性和安全性^[6],以及在大规模建筑用能和工业应用中的低成本特性而成为最具吸引力的技术之一^[7]。

LHTES 技术利用相变材料(PCM)吸收或释放热量来实现能源存储^[8],但工程常见 PCM 的导热系数普遍较低($\lambda \leq 0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$),严重制约了 LHTES 系统的储能效率^[9]。提高 LHTES 系统热效率的重要手段包括添加金属翅片提高换热面积^[10-11]、添加泡沫金属或多孔材料以提升 PCM 的导热能力^[12]、将相变材料复合封装提高整体换热均匀性等^[13-14]。翅片结构以其结构简单、安装方便、换热效率提升明显而备受关注^[15-16]。

Abidi 等^[17]开发了三管换热储能单元的二维数值模型,研究了多种设计参数如翅片长度、厚度、翅片数量以及单元几何形状对凝固性能的影响。研究表明 8 根长翅片结构对储热单元中相变材料凝固效果最好,使得凝固时间缩短了 35%。Abdulateef 等^[18]对大型三管式换热器的蓄热性能进行了设计与测试,研究了换热流体质量流量对凝固速率的影响,并对添装纵向、三角形翅片的换热器进行了数值模拟研究,结果表明,相变材料凝固速率随着换热流体质量流量的增加而增大,使用外三角翅片对其凝固性能提升最大,凝固时间降低了 18%。喻家帮等^[19]建立了一种填充泡沫金属和环形翅片的蓄热结构,并对该结构内相变材料的熔化特性进行了实验研究,结果表明,泡沫金属/翅片结构可使相变材料的完全熔化时间降低 16.7%。吴学红等^[20]在太阳能套管式相变蓄热器中增添内翅以提高其蓄热性能,研究发现,换热流体入口流速的增加使得熔化性能提

升,且内侧环形翅片使得总熔化时间降低了 10%。

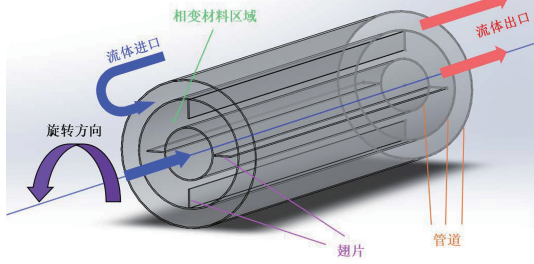
最近的研究中,旋转机制逐步加入到 LHTES 系统中并取得了良好的强化传热效果。Kurnia 等^[21]提出了一种旋转 LHTES 单元,并对其旋转强化传热能力进行了评价,结果表明,旋转能显著提高 LHTES 的换热性能,在 1 r/min 转速下可使充、放热速率分别提高 25%、41%。Soltani 等^[22]使用熔-孔隙率法研究了旋转对 LHTES 凝固和熔化过程的影响,采用响应面法对翅片数量、旋转速度及铜纳米颗粒对传热效率的影响进行了综合分析,结果表明,在减少存储和释放 PCM 总容量 2.50%、4.10% 的条件下,熔化、凝固时间分别缩短了 74%、70%。通过以上研究表明,旋转机制的加入有助于改进 LHTES 系统的传热效率,但由于当前研究较少,其改进程度仍不明确,且可以发现一味地增加转速并不一定带来更好的凝固、熔化速率。

因此,基于上述对 LHTES 系统凝固性能的研究,本文将旋转机制运用到三管潜热热能存储系统(T-LHTES)中,建立了有关翅片热传导、相变材料自然对流和旋转机制的三管相变储热单元数值模型,通过文献实验数据验证了模型的准确性,并研究了不同旋转速度对 T-LHTES 系统凝固性能、热能释放量和放热速率的影响。本文针对旋转机制对 T-LHTES 系统的放热过程进行了深入的研究,研究结果对三管式相变蓄热器的开发与应用具有一定指导意义。

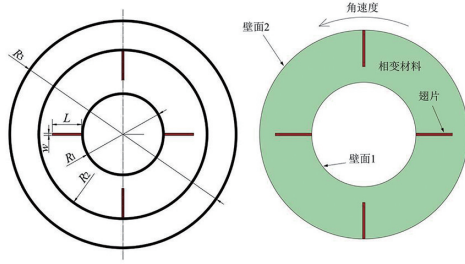
1 研究对象

本文研究对象为水平三管潜热储能单元(T-LHTES),三维模型示意图和二维剖面图与计算域如图 1 所示。其特点在于内管与外管同时通入冷流体,中间管用于填充相变材料(PCM),由于其双面加热的特性,该结构相变性能往往优于双管潜热储热系统。在该结构外部添加扭矩,以达到其旋转所需的转速。根据其双面加热的结构,在外管及内管处各设置两根翅片,内管直径 R_1 、中间管直径 R_2 、外管直径 R_3 分别为 20、40、55 mm,总管长度为 200 mm,管壁厚度均为 0.5 mm,该模型翅片长度 L

为 7 mm, 宽度 w 为 0.5 mm, ω 为旋转的角速度。



(a) T-LHTES 三维模型示意图



(b) 二维剖面图与计算域

图 1 物理模型

Fig. 1 Physical model

管壁及翅片材料均为铜制, 考虑到易于商业获得, PCM 选用正二十烷, 铜及正二十烷的热物理性质如表 1 所示^[23]。

由于 T-LHTES 单元轴向长度有限, 且轴向温度梯度远小于径向温度梯度, 故本文计算域简化为二维, 并做如下假设^[24]: ① PCM 是纯净物, PCM 热物性恒定, 不随温度变化而变化; ② 采用 Boussinesq 近似来解释密度变化引起的液相 PCM 自然对流; ③ 在传热过程中, 忽略壁面热阻, 且内、外管壁均保持温度恒定; ④ 忽略 PCM 的体积变化、黏滞耗散和壁面热损失; ⑤ PCM 包含固相、液相和糊状区; ⑥ PCM 与翅片附近设定为无滑移边界。

表 1 正二十烷和铜的热物理性质

Table 1 Thermophysical properties of materials (N-eicosane and copper)

热物理性质	正二十烷	铜
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	770	8 978
$c_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	2 460	381
$\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.150 5	387.6
$\mu/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	0.005	
热膨胀系数/ K^{-1}	0.000 9	
$L_h/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	247 600	
T_s/K	308	
T_l/K	310	

2 数值方法

2.1 控制方程

基于前述物理模型和假设, 控制方程如下。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_r) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_r \mathbf{v}) + \rho [\boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{v} - \mathbf{v}_r)] = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{v} - (\nabla \mathbf{v}_r)^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{S} \quad (2)$$

$$\mathbf{S} = \frac{(1 + \beta)^2}{(\beta^3 + \epsilon)} c \mathbf{v}_r \quad (3)$$

$$\mathbf{g} = \begin{cases} g_x = g \sin(\omega t) \\ g_y = g \cos(\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{n\pi}{30} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{S}$ 为达西阻尼源项; c 为糊状区常数, 表示相变过程中速度变化的斜率, 取值通常在 $10^4 \sim 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。由于本文选取的转速较低, 因此转速对糊状区常数的影响可忽略不计, 取定值 $10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ (与未加入旋转机制取值相同)^[25]; ϵ 为很小的系数, 通常取 0.001; $\mathbf{g}$ 为重力加速度向量; ω 为旋转角速度, rad/s ; n 为系统转速, r/min 。

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_r H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (6)$$

$$H = h + \Delta H \quad (7)$$

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT \quad (8)$$

$$\Delta H = \beta L_h \quad (9)$$

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, & T_s \leq T \leq T_l \\ 1, & T > T_l \end{cases} \quad (10)$$

式中: H 为 PCM 总焓; h 为显焓; ΔH 为潜焓; L_h 为相变潜热; β 为液相分数。 T_s 、 T_l 为 PCM 的固体、液体温度。由于本文重点讨论 PCM 的凝固过程, 故释放显热、潜热和总热可定义为

$$Q_s = mc_p (T_i - T_c) \quad (11)$$

$$Q_l = mL_h (1 - \beta) \quad (12)$$

$$Q = m [c_p (T_i - T_f) + L_h (1 - \beta)] \quad (13)$$

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \quad (14)$$

式中: m 为质量; T_i 为凝固过程 $t = 0$ s 时 PCM 的初始温度; T_c 为 T-LHTES 系统凝固时的当前温度; $\dot{Q}$ 为热传递速率; t 为凝固时间。

2.2 边界条件

该模型中 PCM 通过内外管道放热而凝固。初始条件为

$$t = 0, T_i = 320.15 \text{ K}, u_i = 0 \text{ r/min} \quad (15)$$

由于 T-LHTES 系统双面加热的特性,对内、外管分别施加恒温边界条件,计算域中 T-LHTES 的热边界条件为

$$r = R_1 = 10.00 \text{ mm}, T = T_{w,1} = 290.15 \text{ K} \quad (16)$$

$$r = R_2 = 20.00 \text{ mm}, T = T_{w,2} = 290.15 \text{ K} \quad (17)$$

式中: T_i 为初始温度; T_w 为壁面温度。本文将翅片与 PCM 之间传热区域的温度和热流视为连续的,并给出其数学表达式

$$T_f|_{\Omega} = T_p|_{\Omega} \quad (18)$$

$$-\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial n} \Big|_{\Omega} = -\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial n} \Big|_{\Omega} \quad (19)$$

式中:下标 f、p 分别代表翅片、相变材料; Ω 为翅片和相变材料之间的换热面积。

2.3 数值方法

本文使用计算流体力学软件 ANSYS FLUENT 18.2 来进行数值计算,控制方程采用基于压力的有限体积法求解,采用二阶迎风格式离散动量与能量方程。压力—速度耦合采用 SIMPLE 算法,压力修正方程采用 PRESTO! 格式,能量和动量方程采用 QUICK 格式进行空间离散。连续方程和动量方程的绝对收敛原则分别设置为 10^{-5} 、 10^{-8} 。模拟中旋转的应用,采用了旋转参照系使得模型所有计算域进行旋转,旋转中心设置为计算域的中心。

网格划分采用 ICEM 中的非结构化网格进行划分,且在靠近翅片处进行了网格加密,网格示意图如图 2 所示。为了使数值模型更加精确,本文进行了网格独立性与时间步长分析,如图 3 所示。网格数选择 N 为 11 097、20 914、45 032、82 566 进行独立性分析。图 3(a)为不同网格数下相变材料液相率的演化,表明网格数对该数值模型的影响较小,最大偏差为 3.83%。具体凝固时间如表 2 所示,网格数对凝固时间的影响在 0.75% 以内,故本文采用网格数 N 为 45 032 进行计算。图 3(b)为网格数 N 为

45 032 时不同时间步长对液相率的影响,时间步长选择为 0.10、0.05、0.02、0.01 s 进行比较,由表 2 的结果可知,时间步长除 0.10 s 时误差较大,其余时间步长的误差均较低(在 1.48% 以内)。为保证计算的精确性同时考虑节约计算资源,在 0~50 s 采用 0.01 s 的时间步长计算,50 s 以后采用 0.02 s 的时间步长进行计算。

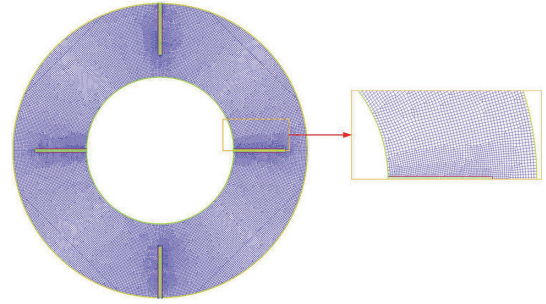
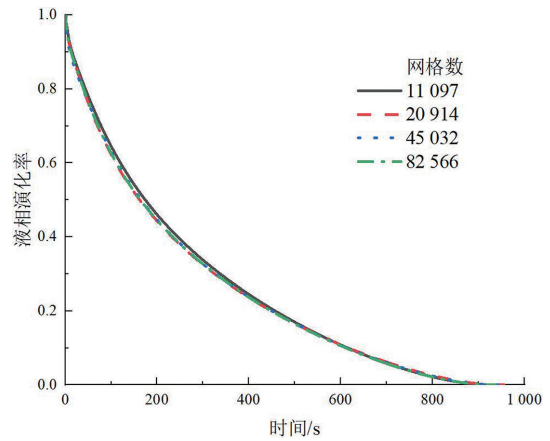
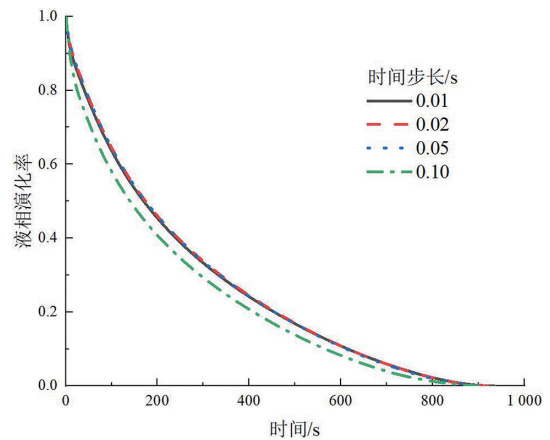


图 2 代表性网格划分

Fig. 2 Diagram of representative mesh



(a) 不同网格数下液相演化



(b) 不同时间步下液相演化

图 3 网格独立性与时间步长分析

Fig. 3 Independence analysis of grid and time step

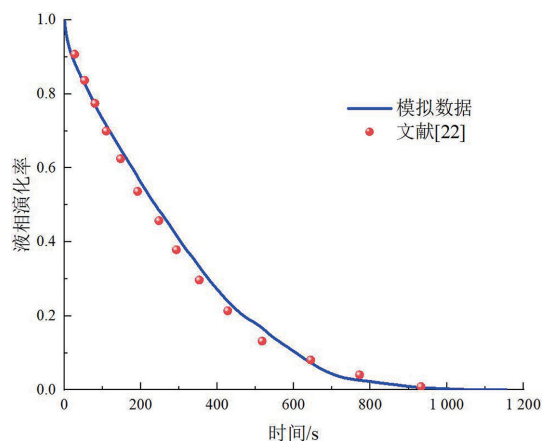
表 2 不同网格数和时间步长的模拟结果

Table 2 Simulation results of different mesh numbers and time steps

网格数	总凝固时间/s	时间步长/s	总凝固时间/s
11 097	929	0.01	937
20 914	923	0.02	935
45 032	935	0.05	930
82 566	936	0.10	918

2.4 模型验证

为了验证本文数值模型的准确性,将本文的数值结果与文献[22]的实验结果进行对比。将数值模型调整为与该论文一致的初始条件与边界条件,相变材料使用 Soltani 等采用的正十二烷。由于本文重点讨论 LHTES 系统在旋转机制作用下的凝固过程,故比较了模拟结果与实验的相变材料凝固过程平均温度,如图 4 所示。由图 4 可以看出,模拟与实验数据基本在同一直线上,最大偏差为 5.39%,验证了本文数值模型的正确性。

图 4 液相率模拟与实验对比验证^[22]Fig. 4 Comparison between the present simulation and the experiment results in literature^[22]

3 结果与讨论

本文以图 1(c)所示模型为基础,比较了无旋转和转速为 0.05、0.10、0.20、0.50 r/min 的凝固过程。图 5、图 6 分别给出了在不同转速下模型的液相分布与温度分布的演化过程,图 7 给出了不同转速作用下 T-LHTES 系统在不同时刻的内部流程图。

无旋转的 T-LHTES 系统凝固过程分为快速凝固、缓慢凝固。由于铜制翅片/管壁的高导热性,且凝固初期液态 PCM 与翅片/管壁温差较大,故初始快速凝固阶段凝固速率较大,凝固性能对比如图 8 所示。在起初 25 s 前后, T-LHTES 系统的凝固速

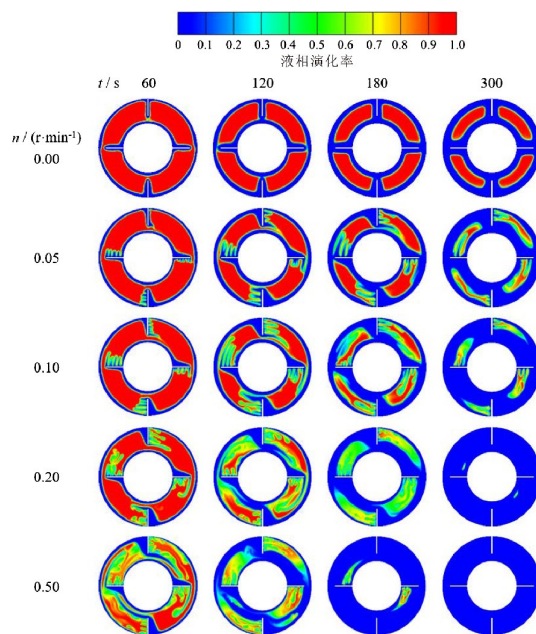


图 5 不同转速下的固相演化

Fig. 5 Solid phase evolution at different rotational speeds

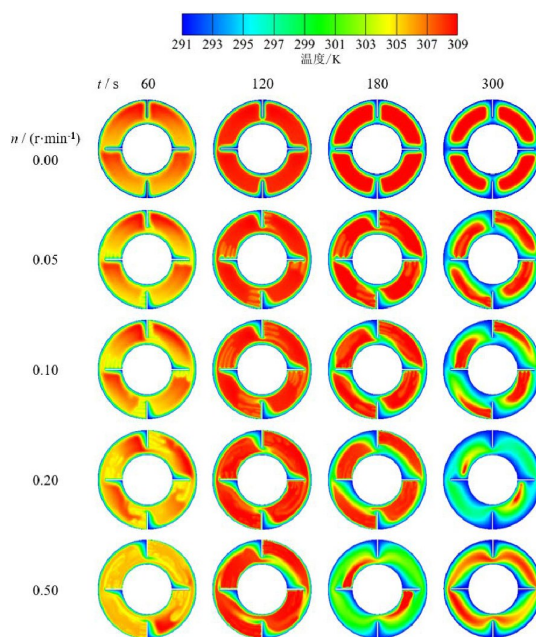


图 6 不同转速下的温度演化

Fig. 6 Temperature evolution at different rotational speeds

率变化较为明显,这是由于随着凝固过程的进行,翅片/管壁与液态 PCM 间的直接换热转换为已凝固 PCM 与未凝固 PCM 间的接触换热。由于铜的导热系数远高于 PCM,导致凝固缓慢进行。此外,观察到自然对流在 T-LHTES 系统凝固过程中作用较小,60 s 时的温度分布表明由于中部翅片的阻碍,高温区集中在内管翅片的下方及系统的上半部分。观察 300 s 时无旋转模型的液相分布后,发现上半部

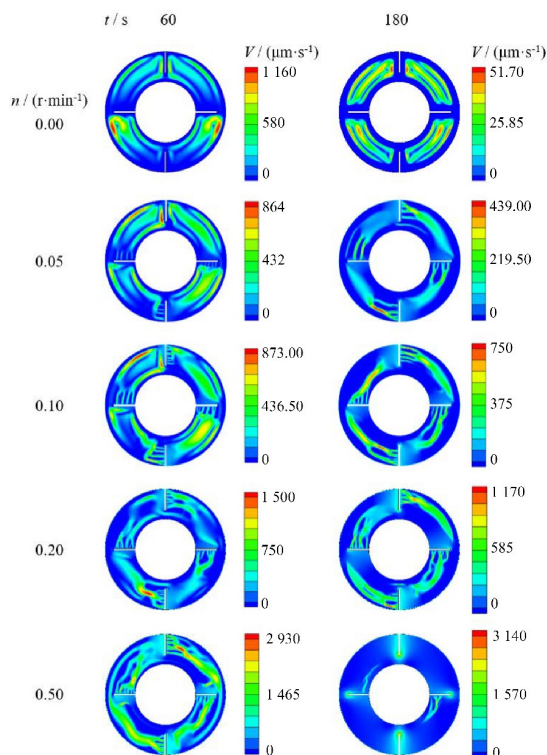


图7 不同转速下的流速分布

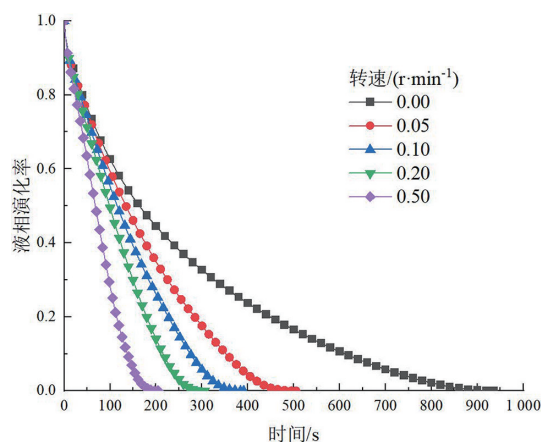
Fig. 7 Flow velocity distribution at different rotational speeds

分液态 PCM 面积略小于下半部分。

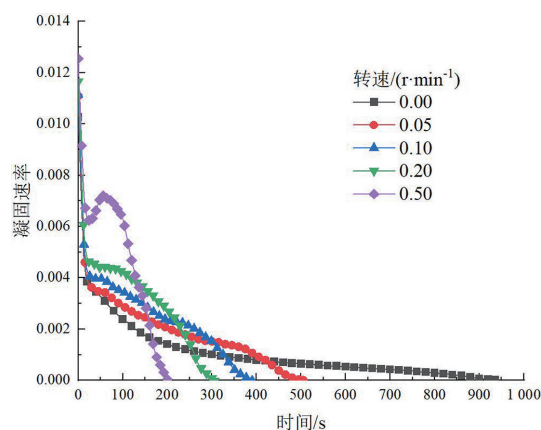
观察图 5、图 6 不同转速下液相分布与温度分布对比,旋转对 T-LHTES 系统凝固过程产生了显著的影响。以 0.05 r/min 为例,当 $t=60$ s 时由于转速的存在,翅片转过的区域产生了一定数量的不规则尾流。随着时间的推移尾流面积逐渐增大,与温度云图对比发现,翅片底部形成了小面积的低温区,且低温区面积随时间逐渐增大。当 $t=180$ s 时,图 5 显示了 0.05 r/min 转速下翅片后方剩余一定量的液态 PCM,与图 6 对比该处温度梯度较高。故旋转的存在改变了缓慢凝固阶段的换热方式,使得铜制翅片的传热范围增加,从而加快了凝固速率。当 $t=300$ s 时,0.05 r/min 转速下液态 PCM 面积仅剩后部的条状区;但对比无转速,温度有一定程度地下降,温度较高区域位置主要集中在翅片旋转后方的尾流区域。当旋转速度 n 逐渐增加,对比图 5 在 60 s 时的液相分布,可以发现转速越大,翅片后方的尾流区面积越大。与图 6 对比可以发现,旋转使得翅片后方低温面积增加,且翅片根部的低温面积同样增大。当 $t=300$ s 时,0.20、0.50 r/min 转速作用下系统凝固基本完成,且内部 PCM 温度相对更低,而 0.05、0.10 r/min 的翅片后方还存在一定的高温 PCM,这影响了凝固过程的完成。总体而言,随着

旋转速度 n 的增加,T-LHTES 系统的凝固速率不断增加,这是由于相同时间内翅片转过的 PCM 面积越大,对其接触的液态 PCM 的凝固效果越强。旋转的加入同样改变了温度分布,随着凝固过程的进行,在翅片旋转后方的尾流区域逐渐形成高温区;翅片旋转前方属于低温区,与液相分布对比也表明旋转前方 PCM 的凝固效果较好。

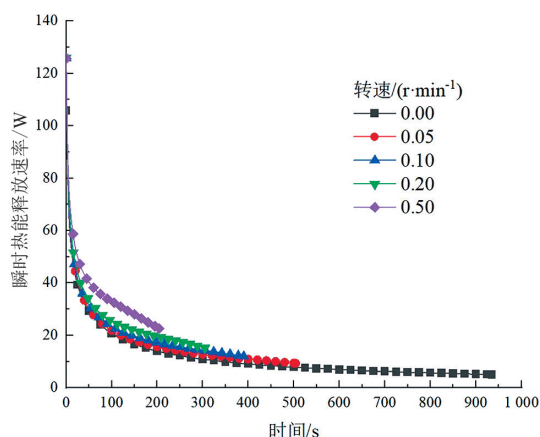
如图 7 所示,选取了 60、180 s 的不同转速 T-LHTES 系统的内部流线分布进行研究。60 s 时无旋转模型内部最高流速为 $1160 \mu\text{m/s}$,高于转速为 0.05、0.10 r/min 作用下的系统内部最高流速;但低于 0.20、0.50 r/min 转速的,这是由于内部 PCM 的自然对流和旋转综合作用的结果。当 $t=180$ s 时,带旋转的 LHTES 系统内部流速均远高于无旋转系统,这是由于此时无旋转系统内部自然对流作用越来越微弱,故旋转作用占主导地位。此时 0.50 r/min 转速的系统内部最高流速为 $3140 \mu\text{m/s}$,相比于 0.20 r/min 转速提高了 168.37%,而 0.10 r/min 转速的内部最高流速仅为 $750 \mu\text{m/s}$,故高转速使得内部流速响应更大,带来了更高的凝固速率。凝固性能对比如图 8 所示。



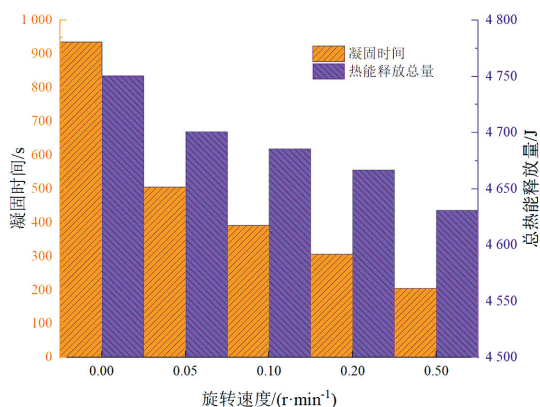
(a) 液相演化



(b) 凝固速率



(c) 热能释放速率



(d) 凝固时间和总热能

图 8 凝固性能对比

Fig. 8 Comparison of solidification performance

图 8(a)、(b) 分别给出了不同旋转速度下的液相演化与凝固速率的对比, 可以看出在不同旋转速度下 T-LHTES 系统内部 PCM 的凝固行为大致相似, 区别在于旋转改变了凝固速率。其中 n 为 0.05、0.10、0.20 r/min 时凝固速率均逐渐降低, 且整体凝固速率均高于无旋转状态; 而 $n=0.50$ r/min 时凝固速率在 30 s 时发生了回升现象, 这说明此时旋转带来的凝固速率远高于自然对流对 PCM 的凝固作用。

图 8(c)、(d) 分别给出了不同旋转作用下的热能释放速率、凝固时间与总热能的定量对比, 不难发现旋转的加入极大地缩短了凝固过程。相比于无旋转情况下, 0.05 r/min 转速下相变材料凝固时间缩短了 45.99%, 热能释放速率则提升了 83.39%, 但总热能释放量降低了 1.05%。相比于无旋转情况, 0.50 r/min 转速时相变材料凝固时间降低了 78.10%, 热能释放速率则提升了 3.45 倍, 然而总热能释放量降低了 2.52%。这说明旋转机制的加入可以大幅缩短凝固时间和提高热能释放速率, 但热

能释放量略有降低。

4 结 论

本文对采用旋转机制的 T-LHTES 系统进行了数值研究, 建立了固液相变数值模型并对模型的准确性进行了验证, 探究了旋转对系统内部凝固行为和温度变化的影响, 并讨论了旋转对 T-LHTES 系统凝固性能、热能释放量及释放热能速率的影响, 所得结论如下。

(1) 通过旋转可显著改善 T-LHTES 系统的凝固性能和热能释放效率, 改善缓慢凝固阶段的换热方式, 使得铜制翅片的传热范围增加, 从而加快了凝固速率。

(2) 相比于静止状态, 0.05、0.5 r/min 转速可使凝固时间分别降低了 45.99%、78.1%。0.5 r/min 转速下的热量释放速率是静止状态和 0.05 r/min 转速下的 2.42、4.45 倍。转速的提高可显著缩短凝固时间并提升放热效率, 但热能释放总量的略有降低。

(3) 由于自然对流对凝固过程的影响较小, 旋转的加入可改变静置状态时单一的热传导机制, 增加凝固过程中的内部流速, 使得整体传热更加均匀并有效地改进难凝固区对凝固总时间的影响, 从而提高内部传热效率。

(4) 本文仅探索了定转速对储能系统热能释放过程的影响, 转速的提升可大幅缩短凝固时间, 但同时其对热能释放量有消极影响, 且转速的提高意味着外加力矩的提升与电量消耗的增加。因此, 深化转速对 T-LHTES 系统凝固过程多参数(凝固时间、放热总量和放热效率)影响的研究, 同时开展考虑经济性分析的优化研究, 十分必要, 也是将来研究的重点和热点。

参考文献:

- [1] YANG Xiaohu, WEI Pan, WANG Xinyi, et al. Gradient design of pore parameters on the melting process in a thermal energy storage unit filled with open-cell metal foam [J]. Applied Energy, 2020, 268: 115019.
- [2] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.

- [3] 何雅玲. 热储能技术在能源革命中的重要作用 [J]. 科技导报, 2022, 40(4): 1-2.
HE Yaling. Thermal energy storage technology plays an important role in energy revolution [J]. Science & Technology Review, 2022, 40(4): 1-2.
- [4] 郭增旭, 白青松, 杨肖虎, 等. 不同倾角下通孔金属泡沫强化蓄热实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(1): 157-162.
GUO Zengxu, BAI Qingsong, YANG Xiaohu, et al. Experimental investigation on the heat storage enhancement of phase change materials embedded in open-cell metal foam in an inclined rectangular enclosure [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(1): 157-162.
- [5] 李勇, 郭蓓, 黄官飞, 等. 太阳能热发电复合相变蓄热材料的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(3): 49-53, 95.
LI Yong, GUO Bei, HUANG Guanfei, et al. Experimental investigation on phase change thermal storage material composite for solar energy thermal power [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(3): 49-53, 95.
- [6] ALBDOUR S A, HADDAD Z, SHARAF O Z, et al. Micro/nano-encapsulated phase-change materials (ePCMs) for solar photothermal absorption and storage: fundamentals, recent advances, and future directions [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2022, 93: 101037.
- [7] 孙婉纯, 冯锦新, 张正国, 等. 相变储热技术用于被动式建筑节能的研究进展 [J]. 化工进展, 2020, 39(5): 1824-1834.
SUN Wanchun, FENG Jinxin, ZHANG Zhengguo, et al. Research progress of phase change heat storage technology for passive energy conservation in buildings [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(5): 1824-1834.
- [8] LI Qi, LI Chuan, DU Zheng, et al. A review of performance investigation and enhancement of shell and tube thermal energy storage device containing molten salt based phase change materials for medium and high temperature applications [J]. Applied Energy, 2019, 255: 113806.
- [9] 马朝, 何雅玲, 袁帆, 等. 高温套管式熔融盐相变蓄热器蓄热性能实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(5): 1-8.
MA Chao, HE Yaling, YUAN Fan, et al. Experimental study on the thermal performance of high-temperature shell-and-tube molten salt phase-change thermal energy storage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(5): 1-8.
- [10] 文键, 李科, 刘育策, 等. 利用流固耦合分析的板翅式换热器锯齿型翅片多目标优化 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(2): 130-135.
WEN Jian, LI Ke, LIU Yuce, et al. Multi-Objective optimization of serrated fin in plate-fin heat exchanger by fluid structure interaction [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(2): 130-135.
- [11] 陈亮, 刘道平, 杨亮. 相变储能过程传热强化技术研究进展 [J]. 化工进展, 2017, 36(z1): 291-296.
CHEN Liang, LIU Daoping, YANG Liang. Progress of heat transfer enhancement technology in phase change energy storage process [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(z1): 291-296.
- [12] 杜昭, 阳康, 舒高, 等. 金属泡沫内石蜡固液相变蓄热/放热实验 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 531-537.
DU Zhao, YANG Kang, SHU Gao, et al. Experimental study on the heat storage and release of the solid-liquid phase change in metal-foam-filled tube [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 531-537.
- [13] 田东东, 王会, 刁永发, 等. 金属泡沫铜/石蜡复合相变材料融化传热特性的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(3): 188-196.
TIAN Dongdong, WANG Hui, DIAO Yongfa, et al. Experimental study on the melting heat transfer characteristics of paraffin/copper foam composite [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(3): 188-196.
- [14] 戴远哲, 唐波, 李旭飞, 等. 相变蓄热材料研究进展 [J]. 化学通报, 2019, 82(8): 717-724, 730.
DAI Yuanzhe, TANG Bo, LI Xufei, et al. Research progress of phase change heat storage materials [J]. Chemistry, 2019, 82(8): 717-724, 730.
- [15] 田伟, 梁晓光, 党硕, 等. 金属泡沫-翅片复合结构强化相变蓄热的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(11): 17-24.
TIAN Wei, LIANG Xiaoguang, DANG Shuo, et al. Visualized experimental study on the phase change heat storage enhanced with metal foam [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(11): 17-24.
- [16] GUO Junfei, DU Zhao, LIU Gang, et al. Compression effect of metal foam on melting phase change in a shell-and-tube unit [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 206: 118124.
- [17] ALABIDI A A, MAT S, SOPIAN K, et al. Experi-

- mental study of melting and solidification of PCM in a triplex tube heat exchanger with fins [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 68: 33-41.
- [18] ABDULATEEF A M, ABDULATEEF J, MAT S, et al. Experimental and numerical study of solidifying phase-change material in a triplex-tube heat exchanger with longitudinal/triangular fins [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2018, 90: 73-84.
- [19] 喻家帮, 牛朝阳, 韦攀, 等. 泡沫金属/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.
- YU Jiabang, NIU Chaoyang, WEI Pan, et al. Experimental investigation on the thermal energy storage performance of metal foam/finned tube [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(1): 122-128.
- [20] 吴学红, 姜文涛, 翟亚妨, 等. 内翅式套管相变蓄热器性能研究 [J]. *可再生能源*, 2016, 34(9): 1369-1374.
- WU Xuehong, JIANG Wentao, ZHAI Yafang, et al. Study on the performance of phase change regenerative with inner fin casing [J]. *Renewable Energy*, 2016, 34(9): 1369-1374.
- [21] KURNIA J C, SASMITO A P. Numerical investigation of heat transfer performance of a rotating latent heat thermal energy storage [J]. *Applied Energy*, 2018, 227: 542-554.
- [22] SOLTANI H, SOLTANI M, KARIMI H, et al. Optimization of shell and tube thermal energy storage unit based on the effects of adding fins, nanoparticles and rotational mechanism [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 331:129922.
- [23] DENG Shengxiang, NIE Changda, WEI Guangya, et al. Improving the melting performance of a horizontal shell-tube latent-heat thermal energy storage unit using local enhanced finned tube [J]. *Energy and Buildings*, 2019, 183: 161-173.
- [24] SRINIVASAN S, DIALLO M S, SAHA S K, et al. Effect of temperature and graphite particle fillers on thermal conductivity and viscosity of phase change material n-eicosane [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 114: 318-323.
- [25] GUO Junfei, WANG Xinyi, YANG Bo, et al. Thermal assessment on solid-liquid energy storage tube packed with non-uniform angled fins [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 236: 111526.

(编辑 赵炜 亢列梅)