



不同 PCM 封装结构的相变水箱蓄放热性能研究

王瑞敏^{1,2}, 孙彬博^{1,2}, 余庆华^{1,2}, 冷光辉³

(¹武汉理工大学高温轻合金及应用技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430070; ²武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; ³国辉(武汉)智慧能源有限公司, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 为解决太阳能储热供暖系统中传统蓄热水箱热分层差、蓄热效率低、放热稳定性不足的问题, 提升系统能源利用效率, 本工作开展了相变蓄热水箱的结构设计、数值仿真与实验研究。首先, 搭建小型相变水箱蓄热实验平台, 对比相变水箱与传统水箱的蓄热性能, 并利用实验结果验证数值模型。然后, 设计平板形与圆环形两种相变材料 (PCM) 封装结构, 基于验证后的数值模型开展仿真研究, 对比分析两种结构在蓄热与放热工况下的性能差异, 并探讨流速对放热特性的影响。实验结果表明, 相变水箱的斜温层厚度较传统水箱减小 10.7%, 储热效率更优。数值仿真结果显示, 圆环结构相变水箱的蓄热完成时间较平板结构缩短 19.6%, 放热时间延长 13.7%; 在低流速工况下, 其放热持续时间达传统水箱的 4.19 倍, 展现出更优的热分层效果与放热稳定性。本研究为高性能相变蓄热水箱的工程设计与优化提供了理论依据与技术支持。

关键词: 相变水箱; 蓄放热; 相变材料; 封装结构

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0349

中图分类号: TK 11

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 09-3476-13

Study on heat storage and release performance of phase change water tanks with different PCM encapsulation structures

WANG Ruimin^{1,2}, SUN Binbo^{1,2}, YU Qinghua^{1,2}, LENG Guanghui³

(¹Key Laboratory of High Temperature Lightweight Alloys and Application Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; ²Hubei Key Laboratory of Advanced Automotive Components Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; ³Guohui (Wuhan) Smart Energy Co., Ltd., Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: To mitigate thermal stratification, low heat storage efficiency, and insufficient heat release stability in traditional solar thermal storage water tanks, this study performs a structural design, numerical simulation, and experimental investigation of phase change heat storage water tanks aimed at improving the energy utilization efficiency of the system. First, a small-scale phase change water tank heat storage experimental platform is built to compare the heat storage performance of phase change and traditional water tanks, and the numerical

收稿日期: 2026-04-22; 修改稿日期: 2026-06-22。

基金项目: 湖北省自然科学基金联合基金 (2023AFD187)。

第一作者: 王瑞敏 (2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为储热技术, E-mail: wangrm@whut.edu.cn; 通信作者: 余庆华, 教授, 研究方向为储热技术, E-mail: qhyu@whut.edu.cn。

引用本文: 王瑞敏, 孙彬博, 余庆华, 等. 不同 PCM 封装结构的相变水箱蓄放热性能研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(9): 3476-3488.

Citation: WANG Ruimin, SUN Binbo, YU Qinghua, et al. Study on heat storage and release performance of phase change water tanks with different PCM encapsulation structures[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(9): 3476-3488.

model is verified using the experimental results. Second, two types of phase change material encapsulation structures, namely, flat plate and annular, are designed. Based on the verified numerical model, simulation research is conducted to compare and analyze the performance differences between the two structures under heat storage and release conditions, and the influence of flow rate on the heat release characteristics is discussed. The experimental results demonstrate that the thermocline thickness of the phase change water tank is reduced by 10.7% compared with that of the traditional water tank while yielding higher heat storage efficiency. The numerical simulation results demonstrate that the heat storage completion time of the annular structure phase change water tank is shortened by 19.6% and the heat release time is prolonged by 13.7% compared with the flat plate structure. At low flow rates, the heat release duration of the tank is 4.19 times that of the traditional water tank, demonstrating superior thermal stratification effects and heat release stability. This study provides a theoretical basis and technical support for the engineering design and optimization of high-performance phase change heat storage water tanks.

Keywords: phase change water tank; heat storage and release; phase change material; encapsulation structure

全球能源结构转型与“双碳”目标的推进,使太阳能等可再生能源的规模化应用成为焦点。然而,太阳能资源的间歇性与昼夜、季节波动性,与建筑供暖负荷的稳定性需求存在显著时空错配^[1]。作为解决这一矛盾的关键技术,太阳能储热供暖系统通过实现太阳能在昼夜或季节间的转移(白天存储供夜间、夏季存储供冬季),大幅提高了太阳能系统的能源利用效率与经济性^[2]。在该系统中,蓄热水箱作为核心蓄热单元,其蓄热性能、热损失控制及温度分层特性,直接决定了整个跨季节储热系统的运行效率与投资回报比。因此,优化蓄热水箱的结构设计与储热材料集成,是提升太阳能储热供暖系统整体性能的关键所在。

现有研究围绕蓄热水箱的几何结构展开了广泛探讨,为系统设计提供了重要理论支撑。赵沙沙等人^[3]针对万立方米级水体储热系统的研究表明,水体热损失与综合热价及高径比呈开口向上的类抛物线关系,为大型水体储热的形状设计奠定了理论基础。Khurana等人^[4]则深入对比了截锥形、抛物面形与圆柱形水箱,基于理查德森数、分层数等评价指标指出,高径比越小越有利于减少温跃层厚度与能量损失;在相同高径比下,抛物面形水箱展现出最优的热分层性能。鉴于异形水箱制造难度大,Li等人^[5]进一步研究了圆柱形、圆台形和球形水箱,证实球形水箱具有优异的对称温度分层特性,而圆

台形水箱则兼顾了最佳的温度分层效果与储热效率。Yang等人^[6]通过对尖角形、半球形和平面形等十种水箱的模拟分析,进一步量化了不同形状对热分层能力的影响次序,为工程选型提供了多维度参考。

为进一步突破传统水箱仅依赖水的显热储热的局限性,在传统蓄热水箱中集成相变材料(PCM)成为提升储能密度的有效技术路径。该复合储热方式同时利用了水的显热与PCM的显热、潜热,从而实现能量的高效存储。李慧星等人^[7]通过实验确定了PCM体积占比的优化区间,发现当相变单元体积占比约20%时,蓄、放热能力可分别提高53%与55%,为系统容量配置提供了量化依据。然而,在实际应用中,除金属基材料外,多数有机或无机相变材料普遍存在导热系数低的核心瓶颈^[8]。这一特性导致相变过程响应缓慢,难以匹配太阳能集热的瞬时波动与负荷动态变化,并易引发局部过热或过冷,严重制约系统整体效率与寿命,为此,研究人员从材料改进与结构优化等方面着手研究,以实现PCM蓄放热性能的强化。引入纳米材料是提升热学性能的有效途径,Huo等人^[9]利用碳化钛颗粒改性石蜡,使复合材料导热率显著提升。

相变水箱的结构设计是影响水箱蓄放热效率的关键因素之一,合理的PCM封装方式不仅可以增强与换热流体间的换热,还能引导流场分布,从而

强化整体换热过程。胡冰等人^[10]设计的双层相变复合水箱，将不同熔点的PCM分层布置，实验与数值证明其相比单层PCM水箱具有更优的热分层和更高的蓄热能力，蓄热量较无PCM水箱提升9.7%。Yari等人^[11]提出创新的双壁球形水箱设计，利用外壁PCM直接吸收太阳能，实验验证其在最佳流速下可达74%的热效率，且球形结构在同等体积下空间占位优势显著。Gao等人^[12]搭建了一种多管相变水箱的CFD瞬态模型，分析入口参数与相变管束间距对储热过程的影响，发现管束间距在*x*和*z*方向上最佳性能范围是50~60 mm。Wu等人^[13]提出一种不占用储水容积的新型相变水箱结构，研究发现，当相变材料厚度为30 mm时，放热时间比普通水箱延长10%。综上所述，现有研究从水箱形状、PCM集成、材料改性等多角度为跨季节储热系统优化提供了宝贵思路。

然而，现有研究多集中于水箱形状、翅片强化及PCM改性等方面，对不同PCM封装结构在蓄/放热过程中的性能差异分析不足，相关改进研究较为缺乏。为此，本研究针对太阳能储热供暖系统中的这一瓶颈，开展相变蓄热水箱PCM封装结构的改进与性能研究。通过构建相变水箱全域数值传热模型，系统分析其蓄热性能与温度分层特性，并借助实验验证模型可靠性；进而对比平板形与圆环形两种封装结构的蓄放热性能差异，探讨流速对放热特性的影响。本研究旨在揭示不同PCM封装结构的性能优劣，为高性能相变蓄热水箱的工程设计与优化提供理论依据与技术支持。

1 实验系统与数值模型

1.1 实验系统与方案

本实验搭建的相变水箱蓄热实验系统如图1所示，其主要由蓄热水箱、高温恒温水浴槽、温度采集模块、数据记录模块及辅助支撑结构组成，主要设备的规格参数如表1所示。其中，蓄热水箱内径为98 mm、外径为108 mm、壁厚5 mm，水箱总高度为240 mm，其中顶板与底板厚度均为5 mm，在水箱中部同轴布置内径23 mm、壁厚1 mm、高度230 mm的圆柱管，该圆柱管作为相变材料（或水）的填充载体，实现蓄热介质与水箱内水体的热量传递。考虑到实验过程的可视性，水箱与圆柱管均采用聚碳酸酯（PC）材料，导热系数为0.19 W/(m·K)。

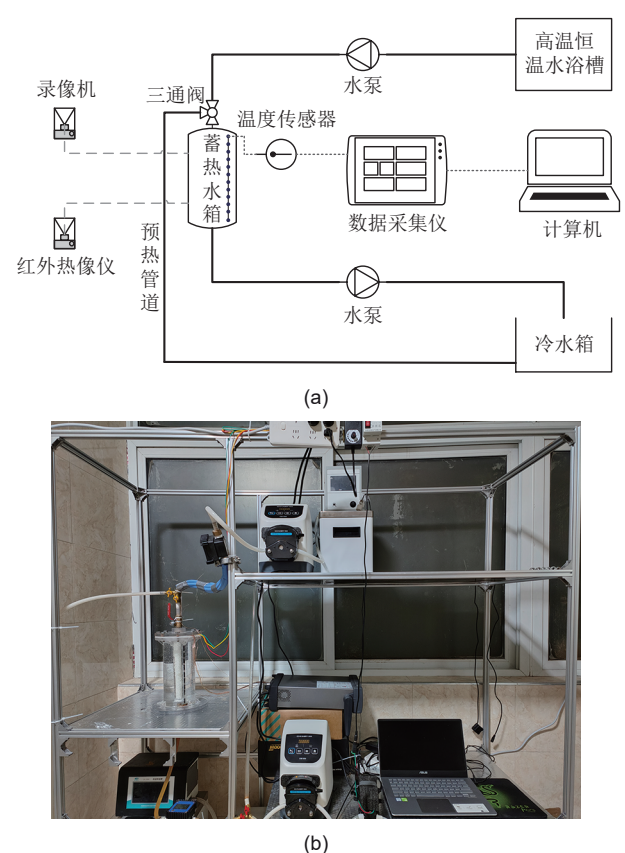


图1 实验系统图：(a) 原理图；(b) 装置图
Fig. 1 Experimental system diagram: (a) Schematic diagram; (b) Setup diagram

表1 实验装置
Table 1 Experimental setup

实验装置	规格参数	实验装置	规格参数
高温恒温水浴槽	勒普拓 BC206AH	数据采集仪	是德科技 DAQ970A
水泵	创锐 CM1000	红外热像仪	燧石技术 AT61P
温度传感器	K 型热电偶	液位控制器	跃通 DF-96DK

沿水箱高度方向均匀布置12个温度监测点，全面捕捉水箱内水温的分布变化规律；热电偶传感器与数据采集仪连接，采集频率设置为1次/秒；水箱外壁面温度采用红外热像拍摄记录，可导出外壁面温度分布数据。对于蓄热工况，热水进口设置于水箱顶部，出口位于水箱底部，形成自上而下的热水注入与热量扩散路径，由于该储热装置应用于太阳能跨季节储热供暖系统，储热水箱进水为太阳能集热器循环加热后的高温水，因此将热水进口温度设置为90℃^[14]，设置入口流速为0.2 m/s，符合集热循环系统的常规运行工况，避免流速过大造成剧烈的掺混影响热分层。对于放热工况，热水从水箱

顶部抽出放热后从水箱底部回到水箱, 基于实际供暖系统运行特性, 供暖回水通常比供暖进水温度低5~10℃, 在48℃的供暖目标进水温度下, 选取40℃作为回水温度, 即放热工况下水箱底部进水温度。

实验设置为两组对照实验, 除PC管填充介质不同外, 其余条件均保持一致, 以确保实验结果的可比性: 实验A为PC管内填充水(与水箱内流体一致), 作为无相变蓄热的参照组, 命名为基准水箱; 实验B为PC管内填充相变温度约45℃的石蜡, 作为含相变蓄热的实验组, 命名为相变水箱。测试开始前, 通过水泵向水箱充入19.6℃的水, 借助水位控制器实现定高加水, 到达设定高度后自动停止; 静置几分钟后将三通阀通向预热管道, 开启循环水泵对入口进行预热, 当检测到入口温度达到约90℃后关闭预热, 正式开启实验。

1.2 数值仿真模型

1.2.1 几何模型

基于实验装置的实际尺寸, 按照1:1比例构建如图2所示的三维几何模型, 模型包含水箱、挡板、水、中部封装管及内部填充介质五部分, 材料参数设置与实验完全一致。采用非结构化多面体网格对计算域进行网格划分, 确保网格质量在0.9以上。



图2 水箱模型图

Fig. 2 Schematic diagram of the water tank

为提高水箱的蓄放热能力, 在原水箱基础上提出两种相变水箱结构, 将相变材料封装成平板形或圆环形, 水箱的结构如图3所示, 此时相变材料约

占水箱总体积的25%。

两种水箱结构中, PCM层的厚度均为30 mm, 高为2000 mm, PCM层之间的间隔均为50 mm, 平板结构PCM的换热面积为32.014 m², 圆环结构PCM的换热面积为30.802 m²。

1.2.2 数学模型

本系统中水作为传热流体和蓄热介质之一, 其在水箱中的流动与换热过程遵循如下非稳态控制方程:

$$\nabla \cdot (\rho_w \mathbf{v}_w) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_w \mathbf{v}_w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{v}_w \mathbf{v}_w) = -\nabla p_w + \mu_w \nabla^2 \mathbf{v}_w + g(\rho_w - \rho_{ref}) \quad (2)$$

$$\rho_w c_{pw} \left(\frac{\partial T_w}{\partial t} + \mathbf{v}_w \cdot \nabla T_w \right) = \lambda_w \nabla^2 T_w \quad (3)$$

式中, ρ_w 为水的密度(温度相关函数), kg/m³; $\mathbf{v}_w$ 为水的流速, m/s; p_w 为水的静压, Pa; μ_w 为水的动力黏度, Pa·s; g 为重力加速度, m/s²; ρ_{ref} 为环境基准温度下的参考密度, kg/m³; c_{pw} 为水的定压比热容, J/(kg·K); T_w 为水的温度, K; λ_w 为水的导热系数, W/(m·K)。

由于相变材料被封装在细管或薄层内, 熔化后流动微弱, 故本研究不考虑PCM的流动, 仅考虑其导热相变过程。相变材料的传热过程采用焓法模型进行描述, 其对应的能量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\rho_p H_p)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_p \nabla T_p) \quad (4)$$

式中, ρ_p 为相变材料的密度, kg/m³; H_p 为相变材料总焓值, kJ/kg; λ_p 为相变材料导热系数, W/(m·K); T_p 为相变材料温度, K。总焓 H_p 为显热焓 h_p 与潜热焓 ΔH 之和, 其中 ΔH 可表示为:

$$\Delta H = fL \quad (5)$$

式中, L 为相变潜热, kJ/kg; f 为PCM的液相体积分数, 其定义为:

$$f = \begin{cases} f = 0 & T_p < T_{solid} \\ \frac{T_p - T_{solid}}{T_{liquid} - T_{solid}} & T_{solid} < T_{liquid} \\ f = 1 & T_{liquid} < T_p \end{cases} \quad (6)$$

式中, T_{solid} 为PCM的固态相变温度, K; T_{liquid} 为PCM的液态相变温度, K。

水箱壳体与PCM封装管等固体壁面均为各向同性, 其非稳态导热控制方程为:

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

式中, ρ_s 为固体壁面的密度, kg/m³; c_{ps} 为固

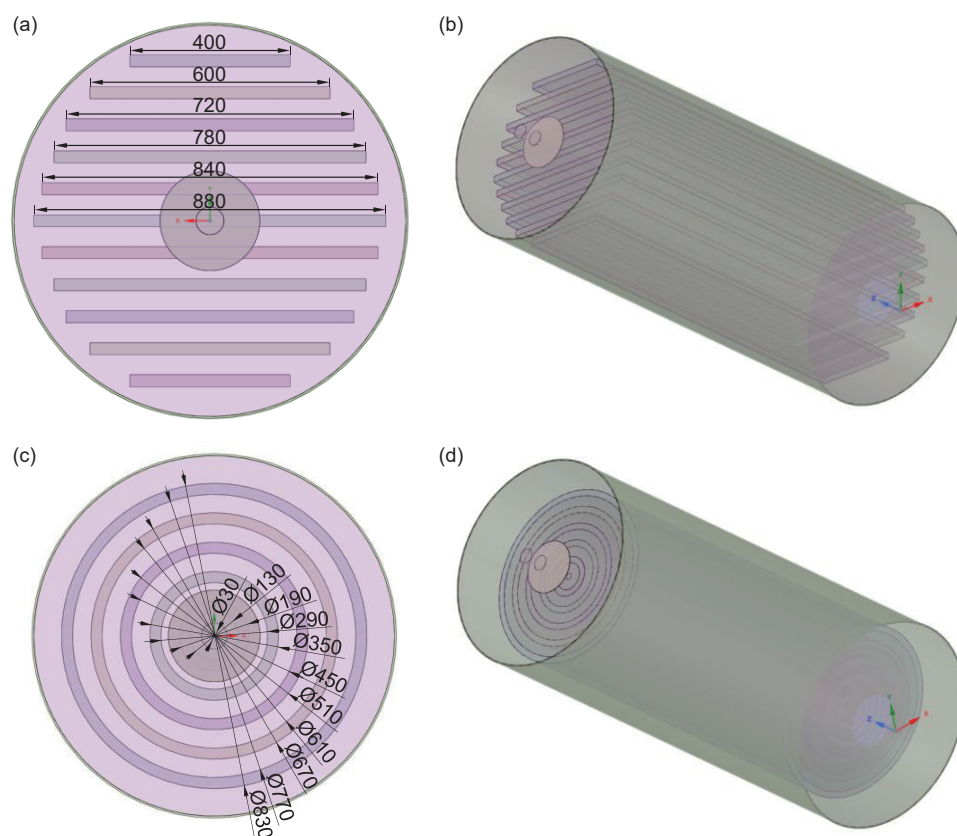


图3 不同封装结构的水箱几何模型图: (a) 平板结构俯视图; (b) 平板结构三维图; (c) 圆环结构俯视图; (d) 圆环结构三维图

Fig. 3 Top views of water tanks with different encapsulation structures: (a) Top view of the flat plate; (b) Three-dimensional view of the flat plate; (c) Top view of the annular ring; (d) Three-dimensional view of the annular ring

体壁面的定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_s 为固体壁面的温度, K ; λ_s 为固体壁面的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

水与相变材料通过管壁交界面实现热量传递, 交界面为热量传输枢纽, 为保证温度场与能量传递的连续性, 消除数值界面误差, 需满足温度连续、热流密度连续两大耦合约束:

$$T_w|_r = T_p|_r \quad (8)$$

$$-\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial n}|_r = -\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial n}|_r \quad (9)$$

式中, r 为水与相变材料的交界面, n 为交界面法向单位向量。

1.2.3 边界条件与物性参数

数值模型的边界条件和初始条件严格按照实验工况设定, 与实验保持一致。水箱顶部的入口水温为 90°C , 流速 0.2 m/s ; 水箱底部出口为压力出口边界; 水箱外壁面为对流换热边界, 换热系数 $h = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 环境温度 295.15 K ; 水箱内水与 PCM 的初始温度 19.6°C 。采用基于压力的求解器,

动量与能量方程采用二阶迎风格式离散, 压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法。

本研究中涉及的储热介质的关键热物性参数如表 2 和表 3 所示。

表2 水的热物性参数

Table 2 Thermophysical properties of water

参数	单位	方程式 ^[15]
密度	kg/m^3	$739.57 + 1.9908T - 0.0038T^2$
比热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$5438.6 - 8.07T + 0.0129T^2$
导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$-0.7888 + 0.0077T - 1e^{-5}T^2$
黏度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	$0.0215 - 1.198 \times 10^{-4}T + 1.701e^{-7}T^2$

1.2.4 网格无关性与时间步长独立性验证

为保障数值仿真结果的可靠性, 分别开展网格无关性验证与时间步长独立性验证。网格验证中, 设置最大网格尺寸为 8 mm 、 5 mm 和 3 mm 的三组模型, 其余条件一致。以蓄热阶段与出口水温随时间的变化和第 120 s 水箱内温度垂向分布为评价指

表 3 相变材料的热物性参数^[16-18]

Table 3 Thermophysical properties of phase change materials^[16-18]

相变材料	熔化温度/℃	相变焓 /(kJ/kg)	导热系数 /[W/(m·K)]	固态密度 /(kg/m ³)	固态比热容 /[J/(kg·K)]	液态密度 /(kg/m ³)	液态比热容 /[J/(kg·K)]
石蜡(PW)	45	160	0.21	880	2200	820	2400
三水乙酸钠(SAT)	58	271.09	0.6	1450	1970	1280	3100
改进三水乙酸钠(MSAT)	58	261.5	2.326	1400	1770	1250	2960

标, 选取该时刻的原因在于, 此时充热过程已推进至水箱中部, 高温热水与低温冷水的交界面清晰, 温度梯度变化显著, 能够有效检验不同网格对流动换热特征与温度场细节的捕捉能力。图 4(a)为采用不同网格划分时出口水温随时间的变化, 当网格尺寸由 8 mm 减至 3 mm 时, 平均相对误差为 1.5%, 而其由 5 mm 减至 3 mm 时, 误差降至 0.9%; 图 4(b)为 120 s 时刻下水温沿水箱高度的变化, 当网格尺寸由 8 mm 减至 3 mm 时, 平均相对误差为 1.8%, 而其由 5 mm 减至 3 mm 时, 误差降至 0.9%, 达到网格无关状态。综合考虑精度与效率, 选定 5 mm

网格进行后续计算。

时间步长验证基于 5 mm 网格, 选取 0.02 s、0.1 s、0.5 s 三组步长。图 4(c)为采用不同步长时出口水温随时间的变化, 当步长由 0.5 s 减至 0.02 s 时, 平均相对误差为 1.8%, 而其由 0.1 s 减至 0.02 s 时, 误差仅 0.5%; 图 4(d)为 120 s 时刻下水温沿水箱高度的变化, 当步长由 0.5 s 减至 0.02 s 时, 平均相对误差为 2.5%, 而其由 0.1 s 减至 0.02 s 时, 误差仅 0.8%, 实现了与步长无关。因此确定最优时间步长为 0.1 s, 在保证计算稳定性和准确性的同时兼顾计算效率。

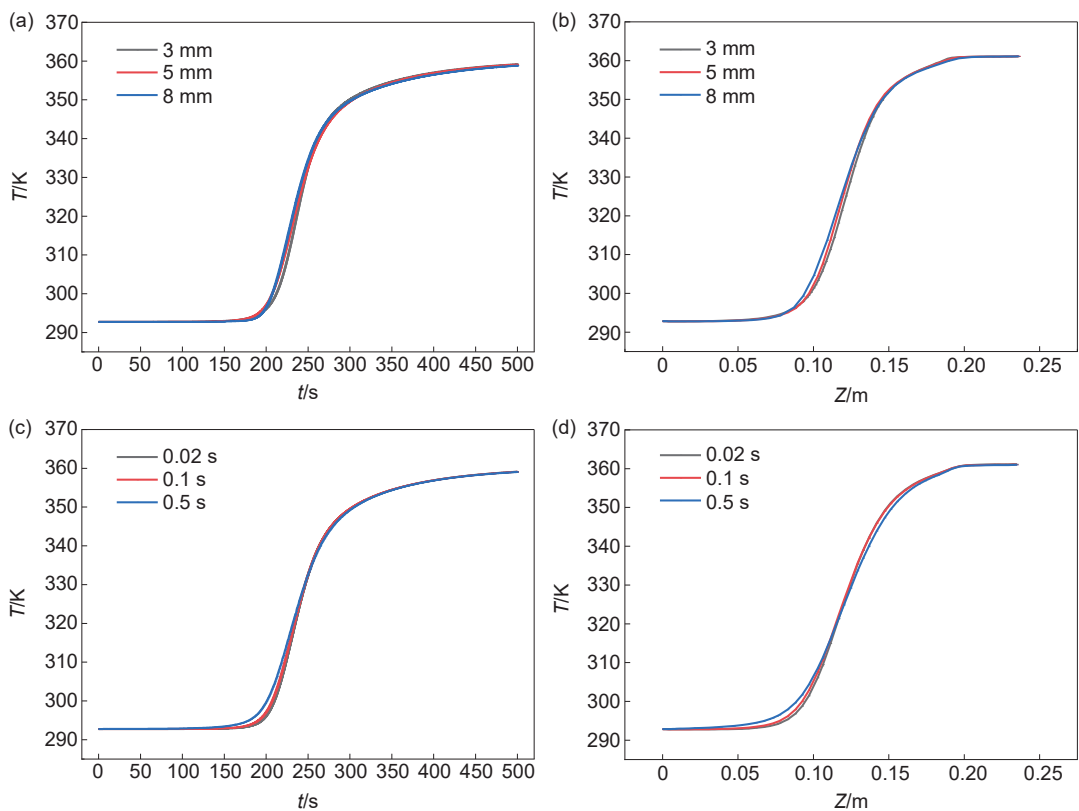


图 4 圆环网格无关性与时间步长独立性验证: (a) 基于出口水温的网格无关性; (b) 基于水箱高度方向水温分布的网格无关性; (c) 基于出口水温的时间步长独立性; (d) 基于水箱高度方向水温分布的时间步长独立性

Fig. 4 Verification of grid independence and step independence: (a) Grid independence based on outlet water temperature; (b) Grid independence based on water temperature distribution along the tank height direction; (c) Time step independence based on outlet water temperature; (d) Time step independence based on water temperature distribution along the tank height direction

2 结果与讨论

2.1 实验分析与模型验证

本研究对所有实验均开展了多次重复测量,图5为蓄热开始后120 s时三次实验测量的不同水箱内水温沿高度方向分布的误差棒图,图6给出了三次测量值的平均值以及两种水箱在相应高度处的水温差。本研究采用30%~70%温差法定义斜温层厚度,即以水箱内总温差的30%和70%所对应的温度作为斜温层的上、下限,二者的差值即为斜温层厚度。图6中标注了两种水箱斜温层上下限位置及厚度,相变水箱的斜温层厚度为0.0335 m,基准水箱为0.0375 m,前者较后者减小10.7%。其原因在于:高温流体流经相变材料时,相变材料通过固-液相变吸收大量潜热,并在相变温度区间形成温度平台,从而延缓温跃层向水箱底部的推进;相比之下,基准水箱仅依靠水的显热储热,热扩散速率较快,难以维持稳定的温度分层结构。稳定的斜温层有利于提高水箱的储热效率,减少因冷热流体掺混导致的热量损失。

此外,为获取水箱外壁面温度分布特征以验证仿真模型,本研究采用红外热像仪拍摄了第120 s时的温度场,结果如图7所示。该图清晰展示了热量在水箱内的扩散路径与温度梯度,高温区域集中于上部。上述实验结果可为后续数值模型的验证提供实测数据。

为验证数值模型及求解方法的有效性,本研究严格参照实验条件设置模型,对比了蓄热阶段第120 s的水温沿高度方向的分布及水箱外表面温度分布(图8)。结果表明,基准水箱与相变水箱内水温的模拟值与实验值平均相对误差分别为5.44%和4.76%,外表面温度平均相对误差为2.94%。考虑实验中存在的空气层干扰、入口温度波动及计时起始差异等误差来源,模拟与实验结果吻合良好,证明所建数值模型及求解方法有效、可靠。

2.2 PCM封装结构对蓄热过程的影响

鉴于供热水温度通常需要不小于45℃,因此所选相变材料的相变温度需要高于45℃。三水乙酸钠($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$,简称SAT)的相变温度约58℃,可满足供热温度要求,且具备较高的相变潜热,是较为理想的候选材料。针对SAT在储热应用中存在导热系数低、易出现过冷与相分离等缺

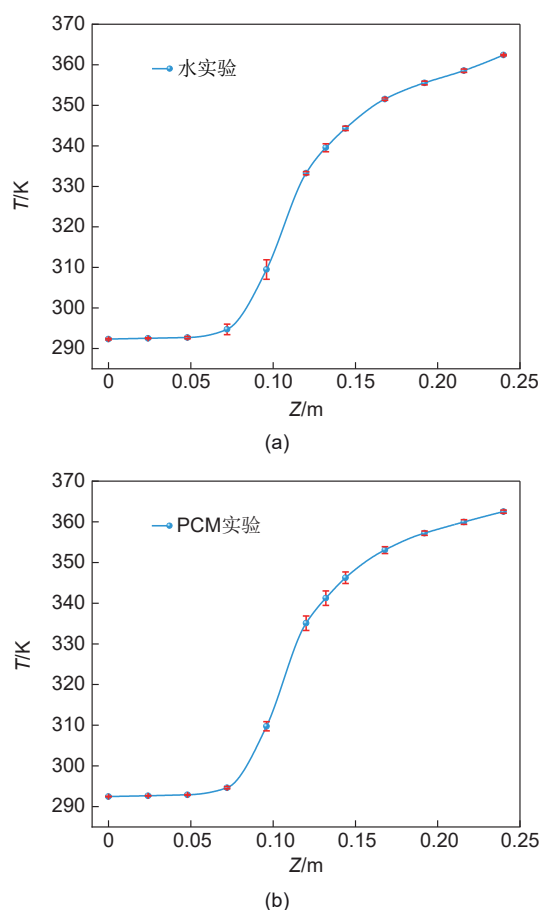


图5 三组实验所测的水温沿高度方向的分布:(a)基准水箱;(b)相变水箱

Fig. 5 Measured water temperature distribution along the height direction in three groups of experiments: (a) Conventional water tank; (b) PCM water tank

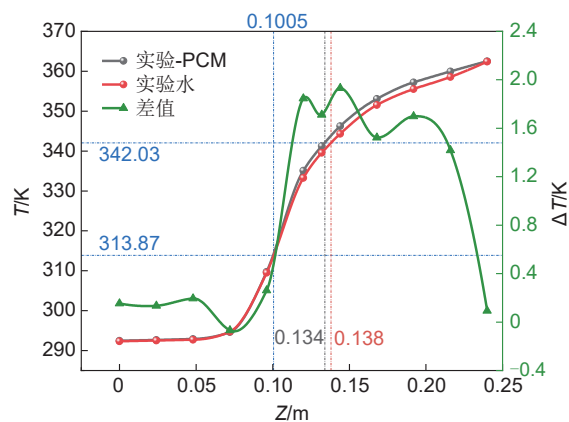


图6 实验所测的相变水箱和基准水箱中水温沿高度方向的分布及两者之差

Fig. 6 Measured water temperature distribution along the height direction in the PCM water tank and conventional water tank, and their differences

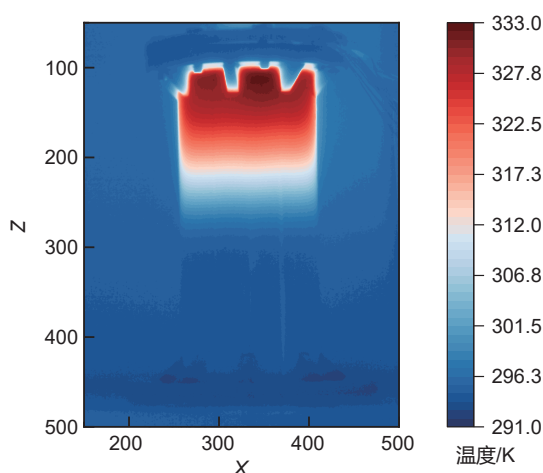


图7 水箱外表面温度分布(红外热像仪拍摄)

Fig. 7 Outer surface temperature distribution of the water tank (captured by an infrared thermal imager)

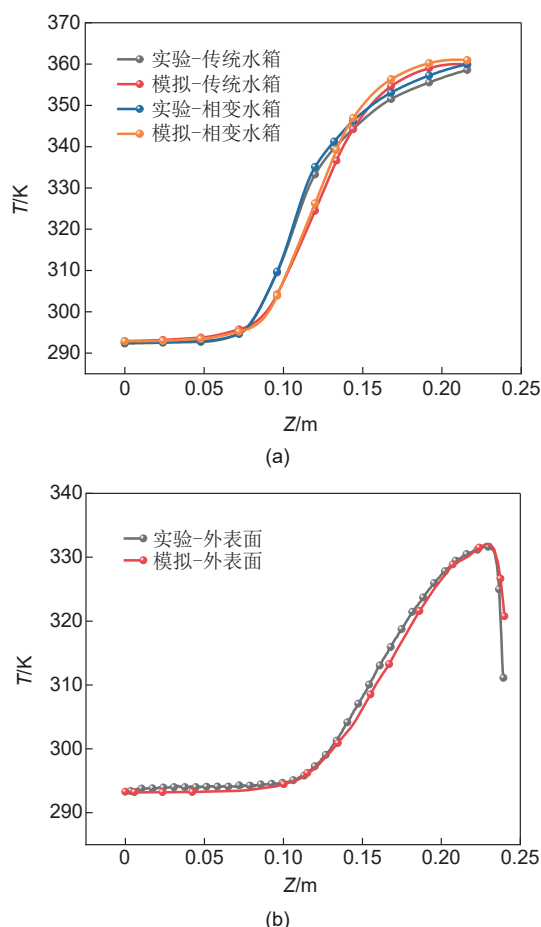


图8 模拟与实验结果对比: (a) 水温沿高度方向的分布; (b) 外表面温度沿高度方向的分布

Fig. 8 Comparison between simulation and experimental results: (a) Water temperature distribution along the height direction; (b) Outer surface temperature distribution along the height direction

陷, 目前已有大量研究通过材料改性技术对其进行优化, 例如加入成核剂抑制过冷现象、引入增稠剂防止相分离、加入膨胀石墨/金属泡沫以提升导热性能。原始SAT与改性SAT(MSAT)的热物理参数对比如表3所示。前期研究表明, 由于原始SAT的导热系数较小, 充热过程非常缓慢, 在较长时间内熔化量有限, 对PCM的利用率较低, 而MSAT的导热系数更高, 有利于加快充热过程, 充分利用PCM的潜热, 因此后续研究均采用MSAT作为PCM。

为量化分析PCM对水箱蓄热能力的影响, 本节以蓄热量为核心评价指标, 传统水箱和相变水箱的蓄热量计算分别为:

$$Q_w = c_p \rho_w V_T (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}) \quad (10)$$

$$Q_{\text{PCM}} = c_p \rho_w (V_T - V_{\text{PCM}}) (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}) + V_{\text{PCM}} \rho_{\text{PCM}} [c_{pl} (T_{\text{hot}} - T_{\text{PCM}}) + L + c_{ps} (T_{\text{PCM}} - T_{\text{cold}})] \quad (11)$$

式中, c_p 为换热流体定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ρ_w 为换热流体密度, kg/m^3 ; V_T 为水箱体积, m^3 ; V_{PCM} 为相变材料体积, m^3 ; T_{hot} 为进口高温流体的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{cold} 为水箱初始温度, $^{\circ}\text{C}$; ρ_{PCM} 为相变材料密度, kg/m^3 ; c_{pl} 为相变材料液态比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_{PCM} 为相变材料熔点温度, $^{\circ}\text{C}$; L 为相变材料的相变潜热, kJ/kg ; c_{ps} 为相变材料固态比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

两种相变水箱的PCM体积占比均为25%, 通过以上公式可以计算出蓄热完成后, 传统水箱蓄热量为 $5.35 \times 10^5 \text{ kJ}$, 相变水箱蓄热量为 $6.70 \times 10^5 \text{ kJ}$, 相比传统水箱提高了约25.2%。

本节模拟基于图3所示两种不同结构的相变水箱以及传统水箱(无任何内部构件, 仅依靠水显热储热)开展。图9给出了蓄热过程三种水箱的PCM液相率与出口水温随时间的变化曲线。由图9(a)可知, 圆环结构与平板结构中PCM完全熔化所需时间分别为6926.5 s和8611.5 s, 表明圆环结构的熔化速率更快, 其蓄热速率较平板结构提升约19.6%。图9(b)为出口水温随时间的变化曲线。对于传统水箱, 其内部体积比相变水箱更大, 热水到达水箱底部所需时间更长, 在2000 s左右, 出口水温迅速升高, 3000 s后逐渐趋于稳定; 对于相变水箱, 在1700 s左右, 热水扩散至水箱出口, 圆环结构水箱的出口水温较平板结构更早开始上升,

说明其内部实际流速更高。随后出口水温快速上升, 至 2600 s 左右接近 PCM 相变温度, 受相变吸热影响, 水温上升速率显著放缓。随着相变持续进行, 已熔化 PCM 比例增大, 出口水温上升速率再度加快, 达到入口水温后趋于稳定。总体而言, 传统水箱蓄热更快, 两种相变水箱中, 圆环结构水箱的出口水温上升更快, 且更早进入稳定阶段。

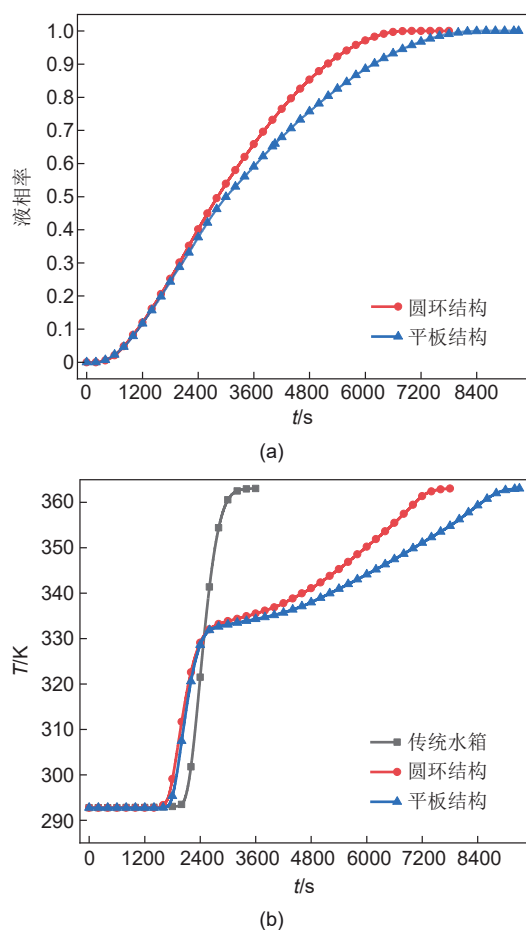


图9 水箱 (a) 液相率与 (b) 出口水温的变化
Fig. 9 Variations of the (a) Liquid fraction and (b) Outlet water temperature in the water tank

图 10 为 3000 s 时刻两种相变水箱中心截面的流速云图。可以看出, 在相同的入口流速下, 不同的 PCM 封装结构导致了水箱内流速分布的显著差异: 平板结构的高流速区域仅集中在局部边缘, 大部分区域流速偏低, 流动分布不均匀; 而圆环封装结构通过环形流道的引导, 使流体在大部分区域保持了更高的流速, 整体流速更为均匀。更高且更均匀的流速强化了水与 PCM 之间的换热, 从而加快了 PCM 的熔化速率, 提升了水箱的蓄热效率。

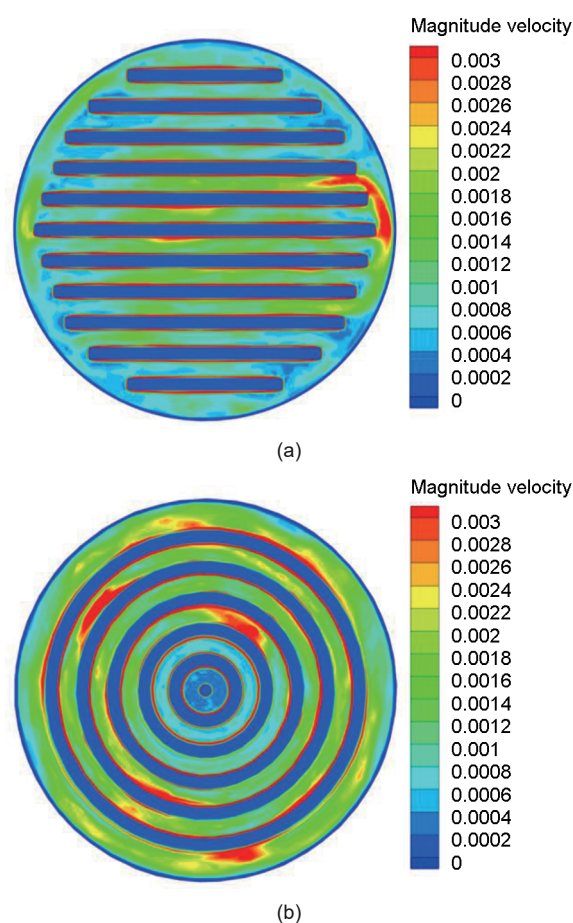


图 10 水箱中心截面流速云图: (a) 平板结构; (b) 圆环结构

Fig. 10 Velocity nephograms at the central cross-section of the water tank: (a) Flat-plate structure; (b) Annular structure

图 11 展示了蓄热过程中两种结构相变水箱内 PCM 体积平均温度随时间的变化规律, 其变化过程可分为两个阶段。第一阶段: 随着热水持续充入, 外层 PCM 率先达到相变温度并迅速熔化; 在 2000 s 左右, PCM 体积平均温度上升至相变温度附近。第二阶段: 2000 s 后, PCM 体积平均温度上升速度显著减缓, 原因是外层 PCM 已完全熔化, 热水与未熔化 PCM 之间被液态 PCM 层阻隔, 传热路径延长, 导致温升速率降低。整体上, 圆环结构相变水箱内 PCM 体积平均温度始终高于平板结构, 表明其具有更快的热交换速率。

为直观展示两种结构水箱在蓄热过程中的温度分布特征, 分别提取 600 s、1800 s、3000 s、4200 s、5400 s、6600 s 时刻下平板结构与圆环结构相变水箱的蓄热工况温度云图进行对比, 如

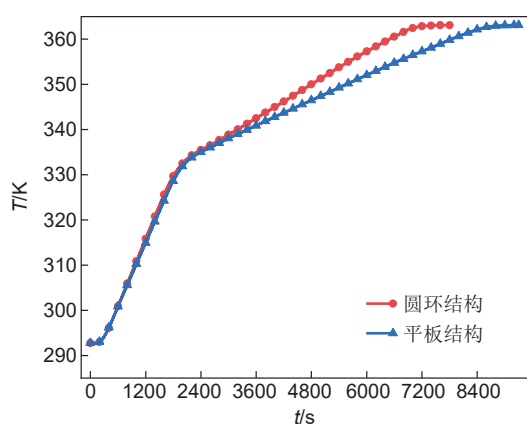


图11 PCM体积平均温度随时间的变化
Fig. 11 Variation of the volume-averaged temperature of PCM with time

图12所示。从瞬时温度分布可以看出,在相同蓄热时间内,圆环结构相变水箱的高温区域体积更大,说明热水扩散速度更快,且热水与相变材料的热交换更充分,这一现象与PCM液相率、出口水温及平均温度的变化规律相印证,进一步说明圆环结构的换热性能更优。

2.3 PCM封装结构对放热过程的影响

结合实际供暖系统的运行特性,供暖回水温度通常低于进水温度 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。鉴于本研究供暖进水温度设定为 48°C ,故将放热工况的进水温度设置为 40°C ,并将进水口布置于水箱底部。

图13揭示了放热过程中不同流量条件下各类水箱出口水温的变化规律。传统水箱仅以水作为储热介质,完全依靠显热储热,放热开始后,低温进水快速与水箱内部热水掺混,出口水温迅速下降,无稳定温度平台,放热持续时间短。相比之下,相变水箱由于相变材料的潜热释放作用,在相变温度附近形成了稳定的出水平台期。图13(a)对比了入口流速为 0.2 m/s 时三种水箱的出口水温,其中圆环封装结构相变水箱的放热持续时间长达 10930 s ,分别是传统水箱(3179 s)和平板封装结构相变水箱(9617 s)的 3.44 倍和 1.14 倍,表明圆环封装结构的相变水箱具有更好的放热稳定性与持久性。考虑到供暖水泵的流量通常低于集热循环水泵,进一步设置入口流速为 0.06 m/s 的工况,对传统水箱

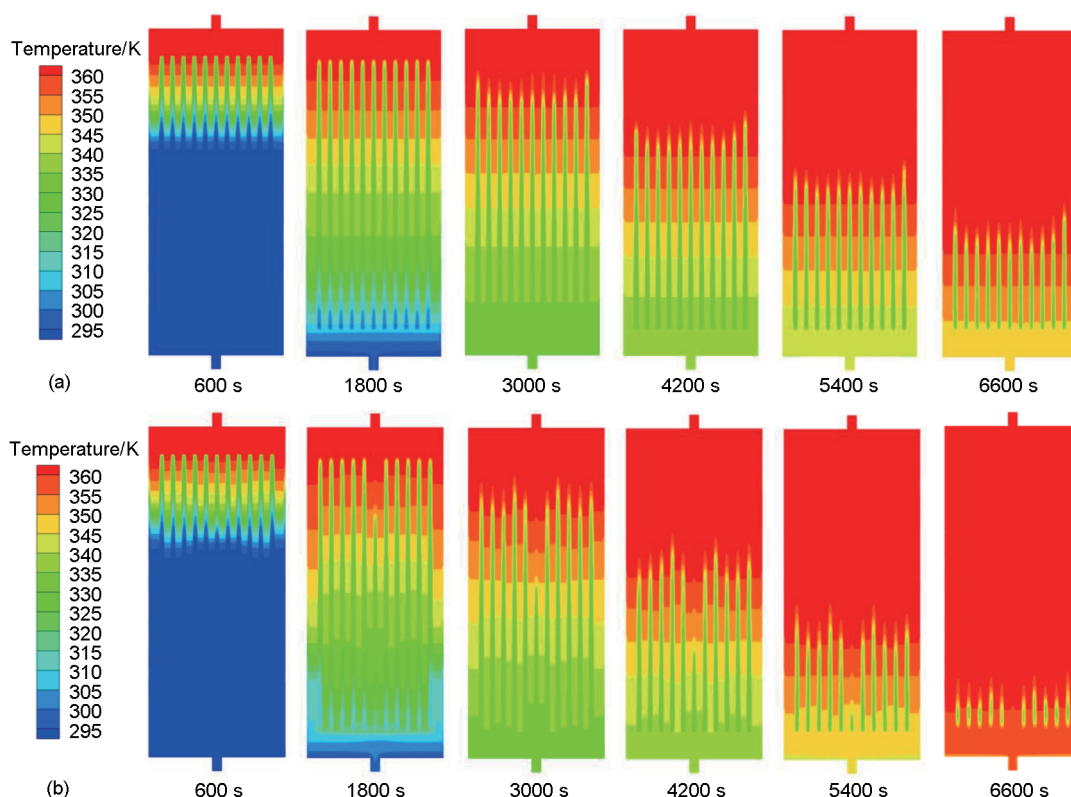


图12 蓄热过程中瞬时温度分布: (a) 平板结构相变水箱; (b) 圆环结构相变水箱

Fig. 12 Instantaneous temperature distribution during the heat storage process: (a) Flat-plate structured PCM water tank; (b) Annular structured PCM water tank

与性能更优的圆环结构相变水箱进行对比,结果如图13(b)所示。当流速降至0.06 m/s时,二者的放热时间差距进一步拉大,相变水箱的放热时间延长至56247 s,较传统水箱(11030 s)提升了4.19倍。该结果证明,相变水箱通过PCM潜热的缓慢释放,不仅能够延长放热持续时间,还能在放热中期维持稳定的出口水温,展现出更优异的热稳定性和持续供热能力。此外,流速对两类水箱放热进程的影响存在差异:增大流速会加速放热进程,但对相变水箱的影响更为显著。这表明,在低流速工况下,PCM潜热释放与水体的换热过程更加充分,相变储热的优势能够得到更有效的发挥,因而更适配实际供暖系统的低流量运行需求。

为直观展示圆环结构相变水箱在放热过程中的温度分布及变化特征,提取进口流速为0.06 m/s时

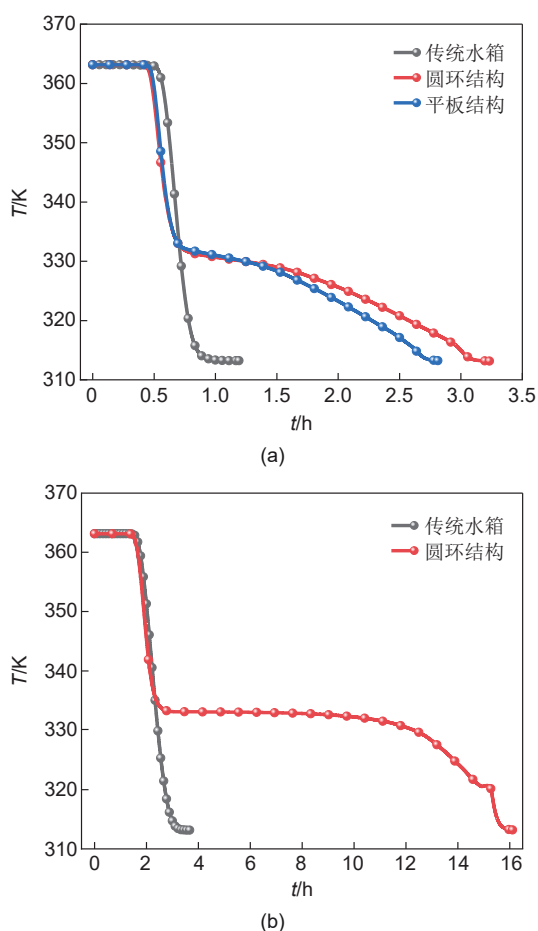


图13 不同入口流速下不同水箱的放热过程出口水温:
(a) 0.2 m/s; (b) 0.06 m/s

Fig. 13 Outlet water temperature during the heat release process of different water tanks under different inlet flow velocities: (a) 0.2 m/s; (b) 0.06 m/s

不同时刻下的温度分布与PCM液相率分布,如图14所示。由图14(a)的瞬时温度分布可见,冷水自水箱底部进入并逐渐向上扩散,形成自下而上的温度梯度。在放热过程的大部分时段内,水箱出口水温基本维持在PCM相变温度附近,形成稳定的温度场;直至放热末期,大部分PCM完成凝固放热,潜热储备基本耗尽,出口水温才开始逐渐下降。该变化趋势与图14(b)中仅剩余少量未凝固PCM的液相率分布高度吻合,与图13所示的出口水温整体变化规律一致,直观且定量地反映了相变材料在放热过程中对出口水温的稳定调控作用。

3 结论

本研究围绕相变蓄热水箱的蓄热与放热性能开展了系统的实验与仿真研究,通过实验测试、仿真模型验证及PCM封装结构对比分析,明确了封装结构对水箱蓄放热性能的影响规律,得出以下结论:

(1) 搭建小型实验平台,对比分析了相变水箱与传统水箱的蓄热性能。结果表明,相变水箱的斜温层厚度较传统水箱减小10.7%,储热效率更优。所构建的Fluent仿真模型与实验值的平均相对误差在6%以内,预测精度良好。

(2) 设计了平板形与圆环形两种PCM封装结构,并在蓄热工况下进行对比分析。结果表明,在PCM体积占比为25%的条件下,相变水箱蓄热量相比传统水箱提升约25.2%;其中,圆环形封装相变水箱的蓄热完成时间较平板形封装结构缩短约19.6%。

(3) 对比分析了不同结构水箱在不同流速下的放热特性。结果表明,相变水箱相比传统水箱具有更长的放热时间和更稳定的放热过程。在流速为0.2 m/s时,圆环形封装相变水箱的放热时间分别是传统水箱与平板形封装相变水箱的3.44倍与1.14倍;当流速降低至0.06 m/s时,其放热时间进一步增大至传统水箱的4.19倍。

在后续研究中将引入更多具有工程潜力的结构类型,如蜂窝形、螺旋形、球体填充床结构,以及基于拓扑优化或仿生设计的新型封装形式,系统评估其蓄热、放热性能及流动特性,并结合多目标优化方法,综合考虑PCM体积占比、换热效率、流动阻力等因素,开展结构参数化研究。

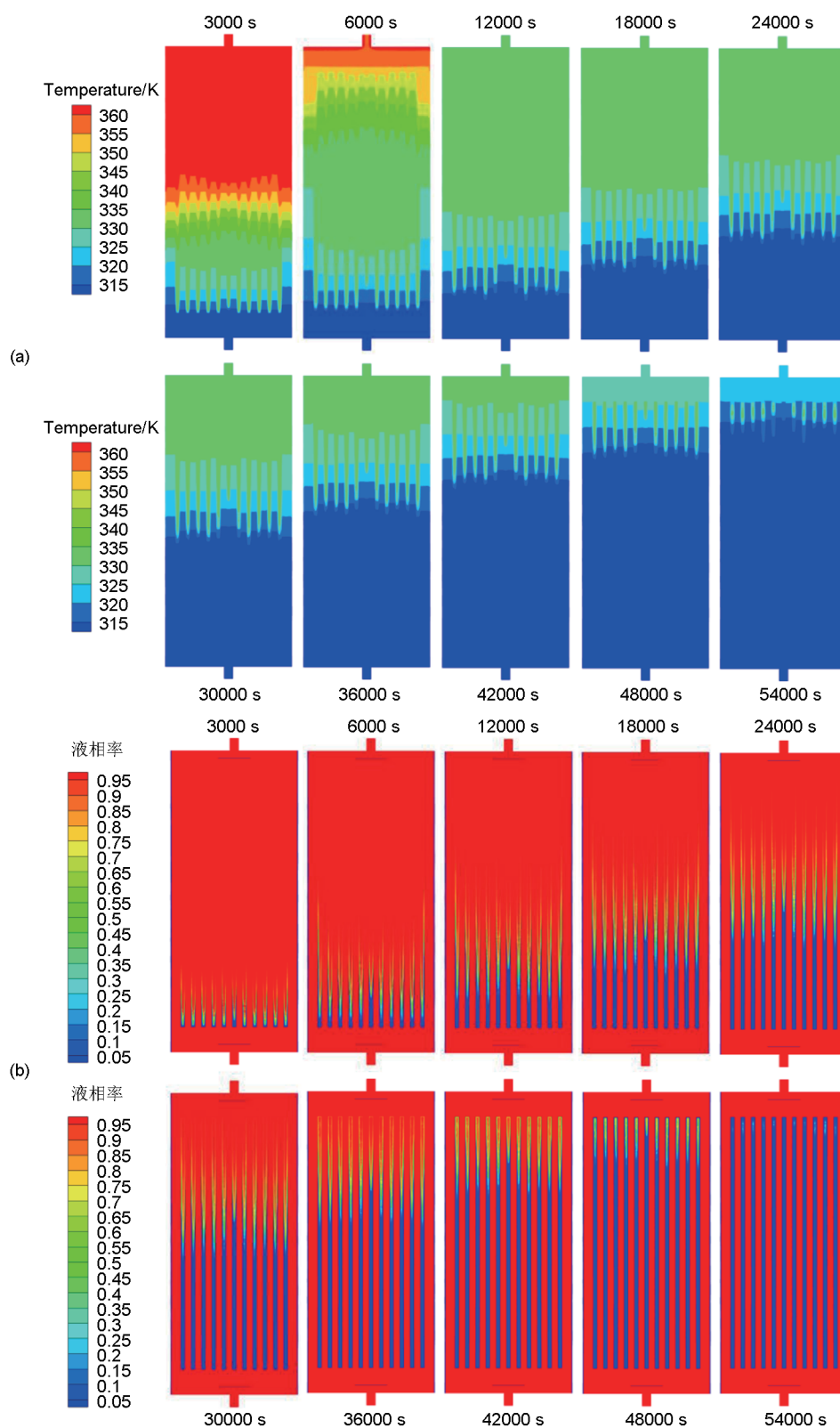


图 14 圆环结构相变水箱放热过程：(a) 温度分布；(b) PCM 液相率分布

Fig. 14 Heat release process of the annular structured PCM water tank: (a) Temperature distribution; (b) PCM liquid fraction distribution

参 考 文 献

- [1] 《中国城乡建设领域碳排放研究报告(2025)》正式发布[J]. 建筑节能 (中英文), 2026, 54(2): 149-150. DOI: 10.3969/j.issn.2096-9422.2026.02.023.
- [2] WANG Z, DE DEAR R, LIN B R, et al. Rational selection of heating temperature set points for China's hot summer-Cold winter climatic region[J]. Building and Environment, 2015, 93: 63-70. DOI:10.1016/j.buildenv.2015.07.008.
- [3] 赵沙沙, 贺明飞, 李金平, 等. 太阳能跨季节储热水体几何形状对系统含税热价的敏感性研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(8): 407-413. ZHAO S S, HE M F, LI J P, et al. Study of sensitivity of geometry of solar seasonal heat storage water pit to tax-inclusive heat price [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(8): 407-413.
- [4] KHURANA H, TIWARI S, MAJUMDAR R, et al. Comparative evaluation of circular truncated-cone and paraboloid shapes for thermal energy storage tank based on thermal stratification performance[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 34: 102191. DOI:10.1016/j.est.2020.102191.
- [5] LI A G, CAO F F, ZHANG W Q, et al. Effects of different thermal storage tank structures on temperature stratification and thermal efficiency during charging[J]. Solar Energy, 2018, 173: 882-892. DOI:10.1016/j.solener.2018.08.025.
- [6] YANG Z, CHEN H S, WANG L, et al. Comparative study of the influences of different water tank shapes on thermal energy storage capacity and thermal stratification[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 31-44. DOI:10.1016/j.renene.2015.06.016.
- [7] 李慧星, 刁兴宇, 冯国会, 等. 折流板相变储能水箱蓄放热能力分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(1): 186-192. DOI: 10.11717/j.issn: 2095-1922.2020.01.23. LI H X, DIAO X Y, FENG G H, et al. Analysis of storage and release capacity of baffled phase change energy storage tanks [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University Natural Science, 2020, 36(1): 186-192. DOI:10.11717/j.issn: 2095-1922.2020.01.23.
- [8] SOHAIL A. Cutting-edge advancements in phase change materials for thermal energy storage: Innovations and applications[J]. Energy Storage and Saving, 2026: DOI:10.1016/j.enss.2025.06.005.
- [9] HUO J H, ZHANG X Y, YANG S Q, et al. Titanium carbide enhanced the thermal management capability of graphene/paraffin wax composite phase change materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2026, 284: 129149. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.129149.
- [10] 胡冰, 李勇, 王登甲, 等. 双层相变材料复合水箱蓄热特性研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 190-198. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-0373. HU B, LI Y, WANG D J, et al. Heat storage characteristics of hybrid tank with double-layer phase change materials[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(7): 190-198. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-0373.
- [11] YARI S, SAFARZADEH H, BAHIRAEI M. Experimental study of storage system of a solar water heater equipped with an innovative absorber spherical double-walled tank immersed in a phase change material[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 61: 106782. DOI:10.1016/j.est.2023.106782.
- [12] GAO J M, ZHAO J, LI Y C, et al. Numerical simulation research on the influence of inlet parameters and tube bundles spacing on heat transfer characteristics of multi-tube phase change water tank[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 154: 121135. DOI: 10.1016/j.est.2026.121135.
- [13] WU F, QI C Y, WANG H B, et al. An optimization study on the performance of hot water tank integrated phase change material [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 223: 119983. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.119983.
- [14] LI X X, JIN L F, YUAN G B, et al. Experimental analysis of a solar heating system with seasonal storage operated in first year[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 269: 126033. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.126033.
- [15] LOU W R, XIE B S, AUBRIL J, et al. Optimized flow distributor for stabilized thermal stratification in a single-medium thermocline storage tank: A numerical and experimental study[J]. Energy, 2023, 263: 125709. DOI:10.1016/j.energy.2022.125709.
- [16] BHARATHIRAJA R, RAMKUMAR T, SELVAKUMAR M, et al. Advancements in paraffin wax phase change materials: A comprehensive review of enhancement techniques and thermal storage applications[J]. Thermochimica Acta, 2025, 753: 180129. DOI:10.1016/j.tca.2025.180129.
- [17] ZHANG B L, ZHU Y H, ZHAO H B, et al. Preparation and properties of sodium sulfate decahydrate shape-stabilized composite phase change material for solar greenhouse[J]. Materials Today Communications, 2025, 42: 111422. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.111422.
- [18] ZHAO M Z, LIU Y J, CHANG C, et al. Preparation and properties of stearic acid-palmitic acid-based shaped composite phase change materials[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 128: 117217. DOI:10.1016/j.est.2025.117217.