



大规模应用导向:相变材料胶囊形状性能评估及传热影响因素研究

张鹏程, 朱国宁, 徐雪琦, 肖益民
(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:为解决相变材料胶囊(PCMC)结构优化方案因量产成本高而难以实现工程规模化应用的问题,本研究基于 Fluent 软件建立三维非稳态焓法模型,对易于工业化生产且内切球球心与几何中心重合的球体、圆柱体、正方体、圆锥、三棱柱以及正四面体 PCMC 的蓄冷过程进行分析。结合液相率、温度场、蓄冷量、蓄冷速率以及傅里叶-斯特凡数,对比不同形状对 PCMC 蓄冷性能的影响,并探究蓄冷过程的内在影响因素。研究表明,形状对 PCMC 蓄冷性能的影响显著,通过内切球半径影响传热过程,且当内切球半径减小时,PCMC 的蓄冷性能提升。正四面体相变材料胶囊(RTPCMC)性能最优且内切球半径最小,球形相变材料胶囊(SPCMC)性能最差且内切球半径最大。与 SPCMC 相比, RTPCMC 的凝固时间、蓄冷完成时间和内切球半径分别减小 34.29%、29.33% 和 36.2%,平均傅里叶-斯特凡数和平均蓄冷速率分别提升 261.81% 和 29.44%。此外,PCMC 的填充率随内切球半径的减小呈缓慢线性下降趋势,而比表面积随半径减小则表现为快速线性增大趋势。在体积、壁厚相同且内切球球心与几何中心重合的条件下,减小内切球半径是提高 PCMC 蓄冷效率的有效手段。

关键词: 相变材料; 胶囊; 形状; 蓄冷; 内切球半径

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0870

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 02-333-11

Large-scale application orientation: Evaluation of phase change material capsule shape performance and research on heat transfer influencing factors

ZHANG Pengcheng, ZHU Guoning, XU Xueqi, XIAO Yimin
(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: To address the limited engineering applicability of phase change material capsule (PCMC) structural optimization schemes caused by high large-scale production costs, a three-dimensional unsteady enthalpy model was established in this study using Fluent. The model was applied to analyze the cold storage process of PCMCs with shapes suitable for industrial production and with the inscribed sphere center coinciding with the geometric center, including sphere, cylinder, cube, cone, triangular prism, and regular tetrahedron. Based on the liquid fraction, temperature field, cold storage capacity, cold storage rate, and Fourier - Stefan number, the effects of capsule shape on cold storage performance were systematically compared, and the intrinsic influencing factors governing the cold storage process were investigated. The results indicate that capsule shape has a significant effect on the cold

收稿日期: 2025-09-29; 修改稿日期: 2025-10-22。

第一作者: 张鹏程 (2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为蓄热技术, E-mail: 18395414103@163.com; 通信作者: 肖益民, 教授, 研究方向为蓄热技术, E-mail: xiaoyimin@cqu.edu.cn。

引用本文: 张鹏程, 朱国宁, 徐雪琦, 等. 大规模应用导向:相变材料胶囊形状性能评估及传热影响因素研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(2): 333-343.

Citation: ZHANG Pengcheng, ZHU Guoning, XU Xueqi, et al. Large-scale application orientation: Evaluation of phase change material capsule shape performance and research on heat transfer influencing factors[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(2): 333-343.

storage performance of PCMCs by influencing the heat transfer process through the inscribed sphere radius. A decrease in the inscribed sphere radius leads to improved cold storage performance. Among the investigated geometries, the regular tetrahedral phase change material capsule (RTPCMC) exhibits the best performance and the smallest inscribed sphere radius, whereas the spherical phase change material capsule (SPCMC) shows the poorest performance and the largest inscribed sphere radius. Compared with SPCMC, the solidification time, cold storage completion time, and inscribed sphere radius of RTPCMC decrease by 34.29%, 29.33%, and 36.2%, respectively, while the average Fourier-Stefan number and average cold storage rate increase by 261.81% and 29.44%, respectively. In addition, the filling rate of PCMCs shows a slow linear decrease with decreasing inscribed sphere radius, whereas the specific surface area exhibits a rapid linear increase. Under conditions of identical volume, wall thickness, and coincident inscribed sphere and geometric centers, reducing the inscribed sphere radius is an effective approach for enhancing the cold storage efficiency of PCMCs.

Keywords: phase change material; capsule; shape; cold storage; inscribed sphere radius

为减弱能源供需的“时间不匹配”问题，达到“削峰填谷”目标，高效储能系统成为应对这些问题的可行途径。目前，主要的储能方式包括以下三类：显热储能，潜热储能以及化学储能^[1]。潜热储能相较于显热储能具有更高的能量密度，与化学储能相比则具有更优的场景适应性^[2]，因此被广泛应用于可再生能源利用领域。填充床储能装置(packed bed thermal energy storage device, PBTESD)是潜热储能的重要应用形式，相变材料胶囊(phase change material capsule, PCMC)作为该系统的核心蓄能单元，其传热性能的提升对改善 PBTESD 性能具有积极作用。提升 PCMC 的传热性能通常采用以下方式：①优化 PCMC 结构^[3]；②制备高导热复合相变材料(phase change material, PCM)^[4-5]。与制备高导热复合 PCM 相比，优化 PCMC 结构具有周期更短、效率更高的优势，通过改变胶囊形状^[6]、配置翅片^[7]和增加内流道^[8]等方式实现。

在研究形状对 PCMC 传热特性的影响时，Cheng 和 Zhai^[9]基于仿生学原理提出了红细胞形状的 PCMC，结果表明符合人类红细胞几何参数的 PCMC 性能最佳。Wang 等^[6]受天然葫芦形状启发，提出了一种仿生葫芦形胶囊蓄热单元，采用数值分析和实验测试对球形、耦合球形和仿生葫芦形胶囊的熔化性能和流动特性进行研究。结果表明，仿生葫芦形胶囊结构对熔化过程具有显著的促进作用，熔化时间较球形胶囊降低 18.2%。为实现填充床系

统的快速潜热储热，Yao 等^[10]提出了叶绿体基粒相变材料胶囊结构，研究发现该结构由于折叠形状会产生多个局部涡流并增强对流换热，使得叶绿体基粒胶囊的储热速率显著快于球形和圆柱形胶囊。上述研究均验证了形状调控可影响 PCMC 性能，但缺乏统一的量化评价指标。为此，Wang 等^[11]提出以质心至胶囊内表面的距离作为评价指标。实验结果表明，PCMC 的凝固和熔化性能不仅与比表面积有关，还与质心至胶囊内表面的距离有关。然而，Tian 等^[12]在引入该指标后发现，圆柱形 PCMC 的质心至胶囊内表面的距离最小，但其熔化性能并未最优。基于此，该研究对该指标进行修正，提出调和平均距离，进一步研究证实，调和平均距离是影响 PCMC 熔化性能的重要因素。

在翅片强化 PCMC 传热方面，Hu 等^[13]研究了带有翅片的球形封装 PCMC，结果表明翅片的引入增强了胶囊的传热面积，从而减少了熔化时间。Meghari 等^[14]采用计算流体力学方法对带有环形翅片的球形 PCMC 进行研究。研究发现，翅片增强换热的途径包括两方面：①增大传热面积，强化热传导；②翅片可诱导其上下区域产生局部自然对流，进而增强对流换热。为进一步探究翅片处于不同位置时 PCMC 的热性能，Sharma 等^[15]采用二维瞬态数值模拟研究了翅片位置对球形 PCMC 热性能的影响，研究表明，翅片位于胶囊中心时熔化时间最短。

为增强 PCMC 内部换热过程，Mao 等^[9]提出了带有波浪形通道的球形 PCMC，研究了通道的波径比和角度对胶囊性能的影响，研究表明，增大通道的波径比会减少 PCM 的熔化时间，通道角度的增大在一定程度上会增加熔化时间。Tang 等^[16]对带有中空通道的球形 PCMC 进行了数值模拟，进一步讨论了通道量纲为 1 直径对 PCMC 的影响，研究表明，熔化速率随量纲为 1 直径呈线性增加，PCM 填充量随量纲为 1 直径呈平方关系下降。

文献综述表明，改变胶囊形状、配置翅片以及增加内流道均能提高 PCMC 的传热性能。但需要注意的是，目前关于 PCMC 结构优化方案的研究虽然在实验和数值模拟层面验证了传热提升效果，却因工艺复杂、生产成本较高等问题，难以在实际工程中大规模推广应用。基于此，本研究对六种易于工业生产的 PCMC 进行研究。首先，建立非稳态凝固传热模型，并采用焓法进行数值模拟。随后，分析不同形状对 PCMC 蓄冷特性的影响。同时，进一步研究了 PCM 填充率和比表面积随内切球半径的变化规律，以量纲为 1 凝固时间、平均蓄冷速率以及平均傅里叶-斯特凡数作为评价指标，验证了内切球

半径对 PCMC 传热过程的影响。

1 模型构建

1.1 物理模型

图 1 是不同形状 PCMC 结构的示意图。球形相变材料胶囊(spherical phase change material capsule, SPCMC)内径为 20 mm，壁厚为 2 mm。其余形状 PCMC 的体积与 SPCMC 保持一致，且壁厚均为 2 mm，以满足控制变量的需求。本研究设计的 PCMC 均为高度对称的简单几何结构，这类结构存在内切球，且内切球的球心与几何中心重合，因此可用内切球半径表征其几何结构特征，具体参数见表 1。

表 1 PCMC 几何参数			
Table 1 PCMC geometric parameters			
形状	内切球半径/mm	PCM 填充率	比表面积/m ⁻¹
SPCMC	20.00	0.751	150
CYPCMC	17.20	0.717	174
CUPCMC	15.74	0.698	191
COPCMC	15.46	0.694	194
TPPCMC	14.25	0.674	211
RTPCMC	12.76	0.646	235

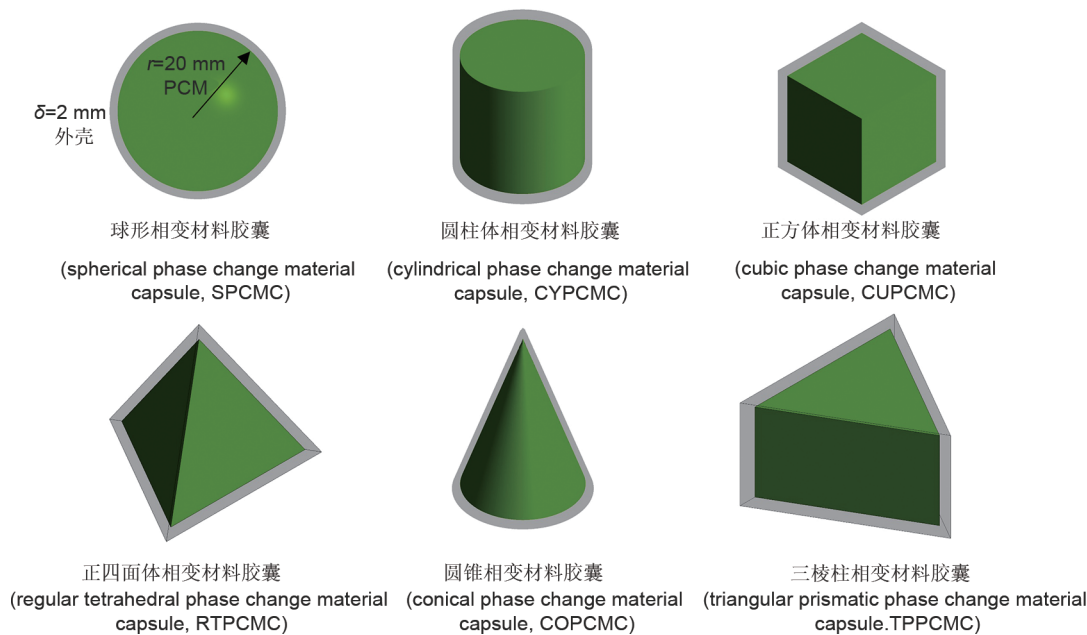


图 1 PCMC 结构
Fig. 1 PCMC structures

1.2 数学模型

为获得最佳模拟结果，同时节约计算资源，对模拟过程作出如下假设：①PCM 无空隙地填充在

PCMC 内部；②忽略 PCM 凝固过程中的自然对流^[17-18]；③PCM 的物性参数在固相区和液相区保持恒定，在糊状区随温度线性变化；④PCMC 外表面

采用等温边界条件^[19-21]。

基于上述假设,采用焓法建立控制方程,PCM能量方程如下:

$$\rho_p \frac{\partial H}{\partial t} = k_p \nabla^2 T_p \quad (1)$$

式中, ρ_p 为PCM的密度; k_p 为PCM的导热系数; T_p 为PCM温度; H 为PCM的总焓,由显热焓 h 和潜热焓 ΔH 组成,定义如下^[22-23]:

$$H = h + \Delta H \quad (2)$$

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^{T_p} c_p dT \quad (3)$$

$$\Delta H = \beta L \quad (4)$$

式中, h_{ref} 为参考焓; T_{ref} 为参考温度; c_p 为PCM的比热容; L 为潜热值; β 为液相率,定义如下。

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

式中, T_s 为固相线温度; T_l 为液相线温度。

PCMC外壳能量控制方程如下:

$$\rho_{\text{sh}} c_{\text{sh}} \frac{\partial T_{\text{sh}}}{\partial t} = k_{\text{sh}} \nabla^2 T_{\text{sh}} \quad (6)$$

式中, ρ_{sh} 、 k_{sh} 、 c_{sh} 和 T_{sh} 分别为外壳的密度、导热系数、比热容和温度。

1.3 边界条件与初始条件

PCMC完全浸没在恒温水浴中,初始条件和边界条件定义如下:

$$\begin{aligned} t = 0: T_p &= T_{\text{sh}} = 295.15\text{K} \\ t > 0: T_{\text{sh-out}} &= 280.15\text{K} \\ -k_s \frac{\partial T_{\text{sh-in}}}{\partial n} &= -k_p \frac{\partial T_{p-in}}{\partial n} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $T_{\text{sh-out}}$ 和 $T_{\text{sh-in}}$ 分别为PCMC外壳的内、外表面温度; T_{p-in} 为PCM与外壳接触处温度。PCM与外壳的物性参数见表2^[24]。

1.4 性能评价指标

1.4.1 蓄冷量(Q_c)

蓄冷量是指PCMC在凝固过程释放的显热和

潜热。

$$Q_c = m_p c_p (T_p^0 - T_p) + m_p (1 - \beta) L + m_{\text{sh}} c_{\text{sh}} (T_{\text{sh}}^0 - T_{\text{sh}}) \quad (8)$$

式中, m_p 为PCM质量; T_p^0 为PCM的初始温度; m_{sh} 为PCMC外壳的质量; T_{sh}^0 为PCMC外壳的初始温度。

1.4.2 蓄冷速率(η_c)

蓄冷速率是指PCMC单位时间储存冷量的能力。

$$\eta_c = \frac{Q_c(t + \Delta t) - Q_c(t)}{\Delta t} \quad (9)$$

1.4.3 平均蓄冷速率($\overline{\eta_c}$)

平均蓄冷速率是指PCMC温度达到平衡时,蓄冷量与对应蓄冷时间的比值。

$$\overline{\eta_c} = \frac{Q_{\text{end}}}{t_{\text{end}}} \quad (10)$$

式中, Q_{end} 为蓄冷结束时的蓄冷量; t_{end} 为蓄冷结束时间。

1.4.4 傅里叶-斯特凡数($FoSte$)

傅里叶数是用来表征热量传递深度与时间关系的量纲为1数^[25]。

$$Fo = \frac{\alpha t}{r_{\text{in}}^2} \quad (11)$$

式中, α 为PCM的热扩散率; r_{in} 为PCMC的内切球半径。

斯特凡数是表征系统显热与潜热比值的量纲为1数^[26-27]。

$$Ste = \frac{c_p (T_p^0 - T_p)}{(1 - \beta) L} \quad (12)$$

本研究中,为统一描述PCM传热与蓄冷特性,采用傅里叶-斯特凡数作为性能评价指标。

$$FoSte = Fo \cdot Ste \quad (13)$$

1.4.5 平均傅里叶-斯特凡数($\overline{FoSte}$)

平均傅里叶-斯特凡数为整个凝固过程中傅里叶-斯特凡数的平均值。

$$\overline{FoSte} = \frac{\int FoSte dt}{\int dt} \quad (14)$$

1.4.6 量纲为1凝固时间(t^*)

量纲为1凝固时间表示各形状PCMC凝固时间与SPCMC凝固时间的比值。

$$t^* = \frac{t_{\text{sp}}}{t_i} \quad (15)$$

式中, t_{sp} 为SPCMC的凝固时间; t_i 为各形状PCMC的凝固时间。

表2 PCMC热物性参数

Table 2 Thermophysical properties parameters of PCMC

热物性参数	PCM	外壳
$\rho/(\text{kg/m}^3)$	845.1(s)/839.7(l)	2700
$c/[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	1825(s)/2214(l)	896
$k/[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	0.145(s)/0.141(l)	167
$L/(\text{J/kg})$	109200	—
T_m/K	283.65(s)/287.65(l)	—

2 数值方法及验证

2.1 数值方法

本研究采用 Fluent meshing 进行网格划分、ANSYS fluent 2022 R1 进行控制方程求解。根据物理模型, 采用非结构化网格对计算区域进行离散。基于压力基求解器, 结合凝固/熔化模型对离散方程进行求解。求解方法采用 SIMPLE 算法, 时间项离散格式采用二阶隐式格式。能量与液相率亚

松弛因子分别为 1、0.9。

2.2 独立性分析

为降低离散误差, 对 SPCMC 的凝固过程进行独立性检验。以 PCM 的平均温度为指标, 采用三种时间步长 (1 s、2 s 和 5 s) 和三种网格数量 (17558、36844 和 47415) 进行对比。结果表明不同时间步长与网格数对 PCM 平均温度的影响十分微小, 因此为节约计算资源, 选择 36844 网格数与 2 s 时间步长进行模拟。

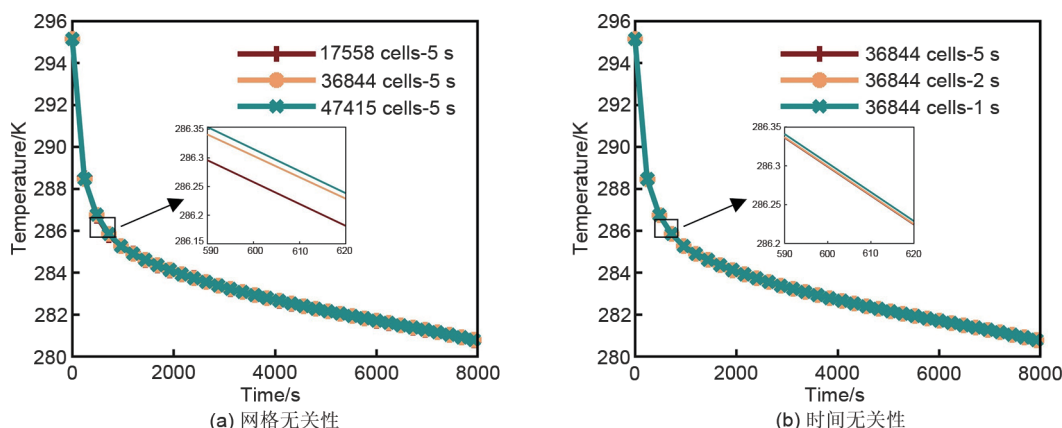


图2 无关性验证

Fig. 2 Verification of irrelevance

2.3 数值结果验证

为了验证模型的准确性, 将模拟结果与 Jia 等^[24]的 SPCMC 实验数据进行对比分析。根据图 3 所示结果, PCM 平均温度变化分为两个阶段, 第一阶段为导热阶段, 第二阶段为相变传热阶段。在导热阶段, PCM 的平均温度急剧下降, 温度变化率大。在相变传热阶段, 由于 PCM 从液相变为固相需释放大潜热, 因此温度变化较为缓慢。实验数据与模拟数据的平均绝对误差为 0.66℃, 平均相对误差为 5.89%, 证实了模型的准确性。

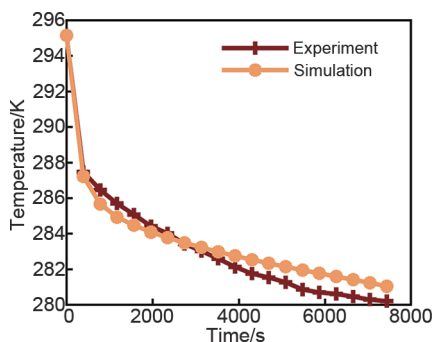


图3 数值模拟结果验证

Fig. 3 Verification of numerical simulation results

3 结果与讨论

3.1 液相率分析

图 4 展示了凝固过程中 PCMC 的液相率随时间的变化。RTPCMC 的凝固速率最快, 在 5520 s 时完全凝固。SPCMC 的凝固时间最长, 在 8400 s 时完全凝固。RTPCMC 的凝固时间较 SPCMC 降低 34.29%。CYPCMC、CUPCMC、COPCMC 以及 TPPCMC 的凝固时间, 较 SPCMC 分别降低 10.71%、16.43%、20.71% 以及 25%。

图 5 是凝固过程中 PCMC 的液相率云图。凝固过程中, 固液界面沿着 PCMC 内部面的法线方向, 均匀地向几何中心移动。这是因为全部 PCMC 形状均为高度对称几何体, 同时在凝固模拟过程中, 忽略了自然对流, 仅对温度场进行求解。RTPCMC 的固液界面移动最快, 在 3000 s 时, PCM 的平均液相率达到 0.0731, 同时几何中心处 PCM 发生凝固。其余形状 PCMC 的凝固速率同 SPCMC 相比, 均有不同程度提升, 这表明改变 PCMC 形状对提高其凝固速率具有积极作用。

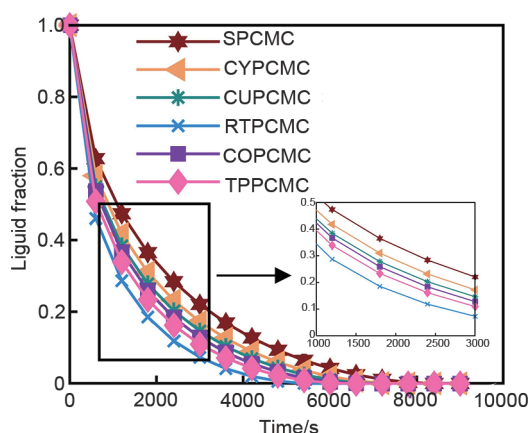


图4 不同形状PCMC的液相率曲线

Fig. 4 Liquid fraction curves of PCMC with different shapes

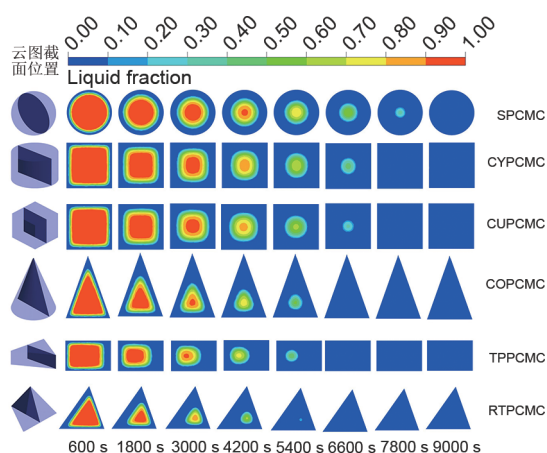


图5 不同形状PCMC凝固过程液相率分布

Fig. 5 Liquid fraction distribution during the cold storage process of PCMC with different shapes

3.2 温度场分析

图6(a)是蓄冷过程中PCMC平均温度变化曲线。在凝固的初始阶段,各形状PCMC的平均温度差异不大。这是因为在初始时刻,传热主要发生在胶囊外壳部分,由于外壳的导热系数较大,温度变化更快,而内部的PCM未及时参与换热,对温度影响较小。随着换热过程的进行,换热的主体部分由外壳变为内部PCM,几何形状对胶囊的传热影响开始显现。RTPCMC最先达到温度平衡,用时为6360 s。TPPCMC、COPCMC、CUPCMC以及CYPCMC达到温度平衡的时间分别为7260 s、7740 s、8160 s以及8760 s。SPCMC在凝固时间内未达到温度平衡。为进一步分析不同形状PCMC的温度变化规律,图6(b)展示了各形状PCMC几何中心的温度变化曲线。PCMC几何中心温度变化分

为四个阶段:①液相导热阶段;②相变传热阶段;③固相导热阶段;④温度稳定阶段。在液相导热阶段,各PCMC的中心温度急剧下降至液相线温度。随后,胶囊中心进入相变传热阶段,由于PCM从液态转化为固态需要释放潜热,因此温度降低十分缓慢,直至温度达到固相线温度。当胶囊几何中心温度达到固相线温度时,标志着相变过程完全结束,此时温度变化率明显增大。最终,胶囊中心温度达到平衡温度,胶囊进入温度稳定状态。

图7为PCMC温度分布随时间的变化。在初始凝固阶段,PCMC温度急剧下降,600 s时各种形状胶囊的PCM平均温度均已处于相变区间。PCMC的温度降低过程,沿其内表面的法线向几何中心均匀推进。RTPCMC的温度变化速率最快。在5400 s时,几乎达到平衡温度。这是因为RTPCMC的内切球半径最小,因此温度更容易传导至几何中心处。其余PCMC的温度传导速率均服从这一规律。温度场分布的变化趋势与液相率分布变化趋势一致。

3.3 蓄冷量与蓄冷速率分析

图8为各形状PCMC的蓄冷速率、蓄冷量以及蓄冷时间对比。当PCMC温度达到平衡时,蓄冷过程结束。RTPCMC最先完成蓄冷,时间为6360 s,较SPCMC缩短29.33%。CYPCMC、CUPCMC、COPCMC以及TPPCMC的蓄冷时间依次缩短2.67%、9.33%、14.00%以及19.33%。结果表明几何形状对PCMC的蓄冷过程有显著影响。在蓄冷速率方面,初始时刻各形状PCMC的瞬时蓄冷速率几乎一致。在1000 s时,蓄冷速率开始呈现差异,SPCMC的瞬时蓄冷速率自此保持最高水平。这是因为与SPCMC相比,其他PCMC温度传递速率更快,导致胶囊与外部环境的温差更小。除CYPCMC外,其他PCMC的平均蓄冷速率较SPCMC均有不同程度提升,且不同形状PCMC的最终蓄冷量存在差异,这部分内容将在后文详细讨论。

3.4 傅里叶-斯特凡数分析

为进一步解释不同形状PCMC性能提升的原因,图9给出了傅里叶-斯特凡数随时间的变化曲线。在整个凝固过程中,RTPCMC的傅里叶-斯特凡数始终保持最高水平,这表明其热量传递的程度更深,也更容易达到热平衡状态。同时该形状

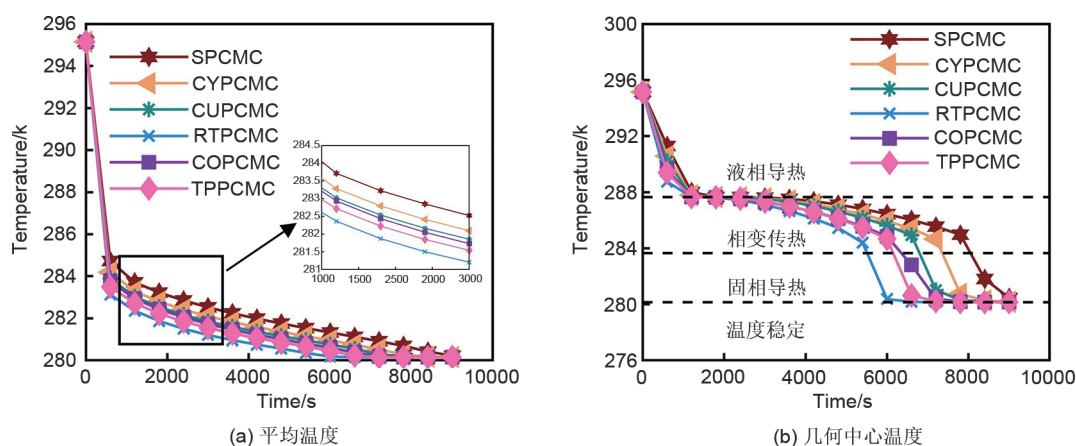


图6 PCMC的温度变化曲线
Fig. 6 Temperature variation curves of PCMC

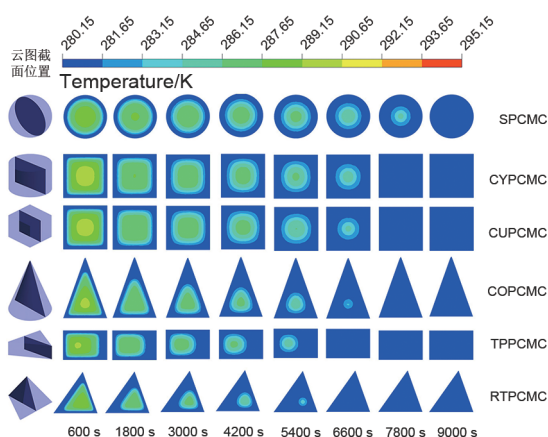


图7 PCMC温度分布
Fig. 7 PCMC temperature distribution

PCMC 还具有良好的储热能力, 进一步证实了几何形状对 PCMC 的性能具有改善作用。COPCMC 与 CUPCMC 的傅里叶-斯特凡数差异较小, 这是因为二者特征长度相近。

3.5 内切球半径对 PCMC 结构参数的影响

蓄冷量的分析结果表明, 不同形状 PCMC 的最终蓄冷量存在差异, 这是由于 PCM 填充率不同所致。PCMC 的内切球半径是表征其几何结构的特征参数, 为进一步探究内切球半径对 PCM 填充率的影响, 图 10 展示了 PCM 填充率随内切球半径变化的曲线。PCM 填充率随内切球半径的增大呈线性增加趋势。这是因为本研究中所选用的几何体的内切球中心与几何中心重合, 当内切球半径减小时, PCMC 的内表面会向几何中心靠拢, 导致可填充 PCM 的空间缩减。RTPCMC 的内切球半径为 12.76 mm, 较 SPCMC 减小 36.2%, PCM 填充率

相应降低 14.04%, 最终蓄冷量相差 370.35 J, 仅占 SPCMC 最终蓄冷量的 8.53%。PCM 填充率随内切球半径的拟合曲线也表明, 填充率随内切球半径的减小而缓慢降低。凝固结束阶段, PCMC 的自身温度与环境温度趋于一致, 蓄冷速率大幅下降, 故内切球半径减小而导致的蓄冷减少量可忽略不计。

相关研究表明, PCMC 的比表面积对其传热性能存在积极影响^[11]。本研究以 PCMC 的内切球半径作为特征长度, 研究了比表面积与内切球半径之间的关系。图 11 为 PCMC 比表面积随内切球半径的变化曲线。PCMC 的比表面积随内切球半径的增大呈线性下降趋势。CYPCMC、CUPCMC、COPCMC、TPPCMC 以及 RTPCMC 的内切球半径, 分别较 SPCMC 减少 14%、21.3%、22.69%、28.75% 以及 36.2%, 而比表面积则分别提升 16.28%、27.1%、29.37%、40.34% 以及 56.7%, 这表明内切球半径对 PCMC 的传热结构影响显著。曲线拟合结果显示, 比表面积随内切球半径变化的斜率为 -11.5494, 表明内切球半径增大时, 比表面积会快速减小, 进而影响 PCMC 的传热性能。

3.6 内切球半径对 PCMC 传热性能的影响

为进一步验证内切球半径对 PCMC 传热性能的影响, 本节分析了量纲为 1 凝固时间($\bar{t}$)、平均傅里叶-斯特凡数($\overline{FoSte}$)以及平均蓄冷速率($\bar{\eta}_c$)随 PCMC 内切球半径的变化关系。

图 12 为量纲为 1 凝固时间随内切球半径的变化曲线。结果显示, 量纲为 1 凝固时间随着内切球半径增大呈增加趋势, 但二者并非简单的线性关系。

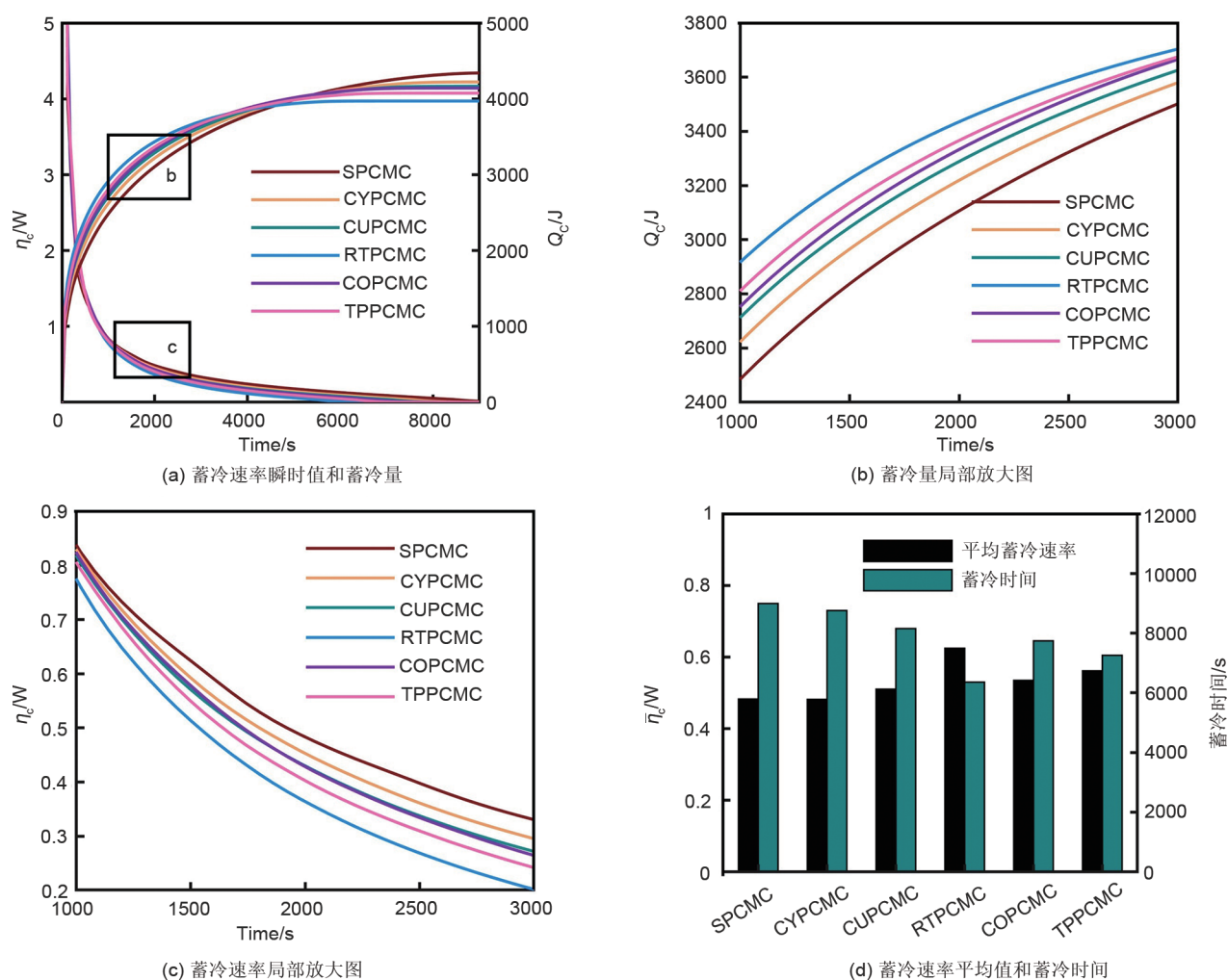


图8 蓄冷速率、蓄冷量以及蓄冷时间对比

Fig. 8 Comparison of cool storage rate, cool storage capacity and cool storage time

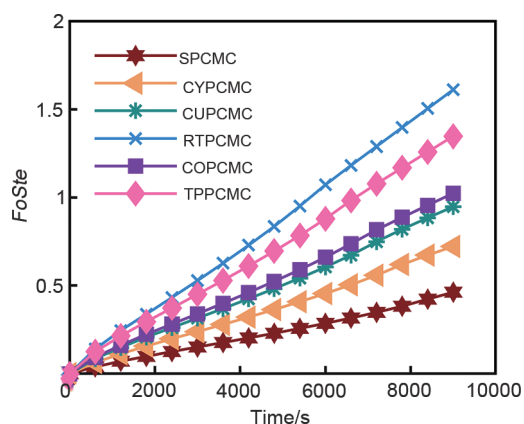


图9 傅里叶-斯特凡数变化曲线

Fig. 9 Fourier-Stefan number variation curve

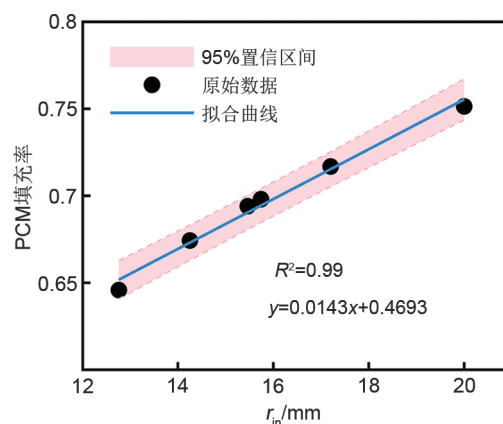


图10 PCM填充率拟合关系

Fig. 10 Fitting relationship of PCM filling rate

值得注意的是, 内切球半径从 15.46 mm 增加至 15.74 mm 时, 量纲为 1 凝固时间的变化率发生突变。这是因为 PCMC 的凝固过程不仅受内切球半径

影响, 还与 PCM 填充率有关。当内切球半径增大时, PCM 填充率随之增加, 进而导致凝固过程延长。

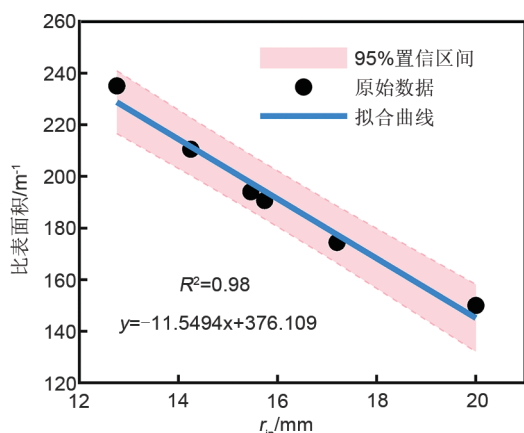


图 11 PCMC 比表面积拟合关系

Fig. 11 Fitting relationship of PCMC specific surface area

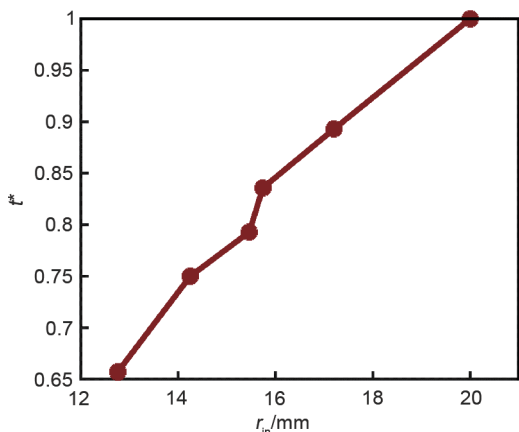


图 12 量纲为 1 凝固时间变化曲线

Fig. 12 Variation curve of dimensionless solidification time

平均蓄冷速率是衡量 PCMC 蓄冷性能的重要指标，图 13 展示了其随内切球半径的变化关系。结果表明，除 CYPCMC 外，其余形状 PCMC 的平均蓄冷速率均在不同程度上较 SPCMC 有所提升，而 CYPCMC 的平均蓄冷速率与 SPCMC 保持一致。这是因为在蓄冷结束时，SPCMC 尚未到达温度平衡，因此本研究采用整个蓄冷过程的时间作为其蓄冷结束时间。此外，随着内切球半径的增大，PCMC 的平均蓄冷速率减小，表明内切球半径的改变能够影响 PCMC 的蓄冷性能。

平均傅里叶-斯特凡数是综合衡量 PCMC 凝固过程中温度传递深度与蓄冷能力的指标。图 14 的结果显示，PCMC 的内切球半径越小，平均傅里叶-斯特凡数越大。这一规律表明，内切球半径更小的 PCMC 不仅具有更强的传热能力，还具备良好

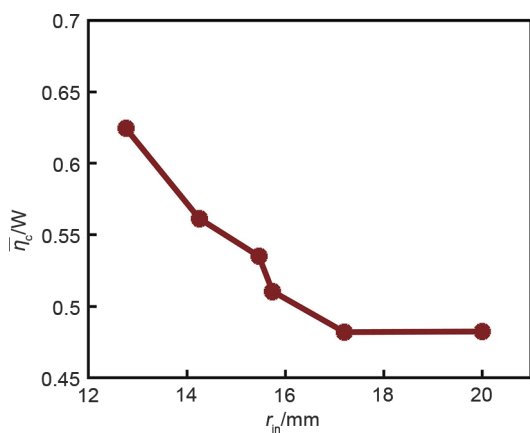


图 13 平均蓄冷速率变化曲线

Fig. 13 Variation curve of average cold storage rate

的蓄冷性能，从而证实内切球半径可以作为优化 PCMC 性能的重要参数。

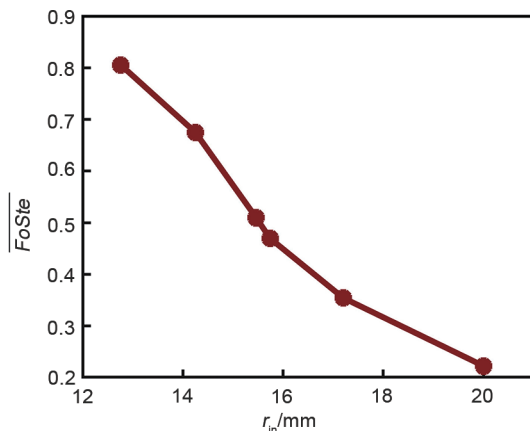


图 14 平均傅里叶-斯特凡数变化曲线

Fig. 14 Variation curve of average Fourier-Stefan number

4 结 论

本工作采用数值模拟方法，对六种易于工业生产、内切球球心与几何中心高度重合且具有等体积、等壁厚特征的 PCMC，进行了蓄冷过程的传热分析。通过液相率、温度场、蓄冷量、蓄冷速率以及傅里叶-斯特凡数衡量了不同形状 PCMC 的传热性能，随后分析了表征 PCMC 几何特征的内切球半径对其结构的影响，主要包括 PCM 填充率和比表面积，最后分析了量纲为 1 凝固时间(t^*)、平均蓄冷速率($\bar{\eta}_c$)以及平均傅里叶-斯特凡数($\overline{FoSte}$)随内切球半径的变化规律。主要结论如下：

(1) 形状的改变对 PCMC 的传热特性具有显著影响。其中，RTPCMC 的性能最佳，与 SPCMC

相比, 其凝固时间和蓄冷完成时间分别缩短 34.29% 和 29.33%, 平均傅里叶-斯特凡数和平均蓄冷速率则分别提升 261.81% 和 29.44%。

(2) PCM 填充率随 PCMC 内切球半径的减小呈线性且缓慢的降低关系, 同时因 PCM 填充率减少造成的最终蓄冷量损失可忽略不计。

(3) PCMC 的比表面积随内切球半径的减小呈线性且快速地增大关系, 可采用内切球半径作为优化其传热特性的核心因素。

本研究结果为 PCMC 的结构优化提供了有价值的见解, 同时为进一步探究影响 PCMC 性能的内在因素提供了新方向。未来工作将主要集中于通过翅片及内流道结构进一步提升 PCMC 的蓄冷性能, 并探索其与填充床储能系统的结合应用。

参 考 文 献

- [1] 张金亚, 周文博, 程紫漪. 基于 LBM 的泡沫金属与翅片相变储能系统性能对比分析[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(2): 598-607. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0570.
- ZHANG J Y, ZHOU W B, CHENG Z. Performance comparison of metal foam and fin phase-change energy storage system based on LBM[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(2): 598-607. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0570.
- [2] LIZANA J, CHACARTEGUI R, BARRIOS-PADURA A, et al. Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: A critical review[J]. Applied Energy, 2017, 203: 219-239. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.06.008.
- [3] JIA H N, YANG J, WANG T, et al. Numerical simulation on the impact of dimpled structure on flow and thermal performance in phase-change spherical capsules within confined spaces[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 99: 113213. DOI: 10.1016/j.est.2024.113213.
- [4] 倪鹏, 曹世豪. 金属蜂窝/石蜡复合相变材料融化储热性能研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(2): 425-435. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0652.
- NI P, CAO S H. Melting heat storage properties of metal honeycomb/paraffin composite phase change materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(2): 425-435. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0652.
- [5] 陈红兵, 高雪宁, 刘涛, 等. 应用石蜡/GO 复合相变材料的太阳能 PV/T 系统性能[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(3): 661-668. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0660.
- CHEN H B, GAO X N, LIU T, et al. Performance of a solar PV/T system applying a paraffin/graphene oxide composite phase change material[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(3): 661-668. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0660.
- [6] WANG F Q, ZHANG G L, SHI X H, et al. Biomimetically calabash-inspired phase change material capsule: Experimental and numerical analysis on thermal performance and flow characteristics[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 52: 104859. DOI:10.1016/j.est.2022.104859.
- [7] 赵兰, 王国珍. 相变蓄热复合传热强化技术综述[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(11): 3534-3547. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0300.
- ZHAO L, WANG G Z. Research progress on composite heat transfer enhancement technology of phase change heat storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(11): 3534-3547. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0300.
- [8] MAO Q J, ZHANG Y F, ZHAO Y. Optimal design and heat transfer performance analysis of channels in spherical phase change capsules[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 90: 111975. DOI:10.1016/j.est.2024.111975.
- [9] CHENG X W, ZHAI X Q. Thermal performance analysis of a novel PCM capsule in red blood cell shape[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 130-137. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2017.03.112.
- [10] YAO H C, LIU X L, LI J W, et al. Chloroplast-granum inspired phase change capsules accelerate energy storage of packed-bed thermal energy storage system[J]. Energy, 2023, 284: 128563. DOI:10.1016/j.energy.2023.128563.
- [11] WANG X L, DJAKOVIC U, BAO H S, et al. Experimental evaluation of heat transfer performance under natural and forced convection around a phase change material encapsulated in various shapes[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 44: 101025. DOI:10.1016/j.seta.2021.101025.
- [12] TIAN Y, LIU X L, ZHENG H B, et al. Artificial mitochondrion for fast latent heat storage: Experimental study and lattice Boltzmann simulation[J]. Energy, 2022, 245: 123296. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123296.
- [13] HU Z M, XUE D L, WANG W, et al. Numerical investigation of the melting characteristics of spherical-encapsulated phase change materials with composite metal fins[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 68: 107902. DOI:10.1016/j.est.2023.107902.
- [14] MEGHARI Z, BOUHAL T, BENGHOULAM M, et al. Numerical simulation of a phase change material in a spherical capsule with a hollow fin[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 43: 103024. DOI: 10.1016/j.est.2021.103024.
- [15] SHARMA A, KOTHARI R, SAHU S K. Effect of fin location on constrained melting heat transfer of phase change material in a spherical capsule: A numerical study[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 52: 104922. DOI:10.1016/j.est.2022.104922.
- [16] TANG Y, WANG Z C, ZHOU J Z, et al. Heat transfer analysis of hollow channel in phase change materials spherical capsule[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219: 119390. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2022.119390.
- [17] SHEIKHOLESLAMI M. Numerical modeling of nano enhanced PCM solidification in an enclosure with metallic fin[J]. Journal of Molecular Liquids, 2018, 259: 424-438. DOI:10.1016/j.molliq.2018.03.006.
- [18] ISMAIL K A R, HENRIQUEZ J R. Solidification of pcm inside a

- spherical capsule[J]. *Energy Conversion and Management*, 2000, 41(2): 173-187. DOI:10.1016/S0196-8904(99)00101-6.
- [19] LEE Y T, HONG S W, CHUNG J D. Effects of capsule conduction and capsule outside convection on the thermal storage performance of encapsulated thermal storage tanks[J]. *Solar Energy*, 2014, 110: 56-63. DOI:10.1016/j.solener.2014.08.034.
- [20] JIA H N, YANG J, ZHOU Z Y, et al. Numerical and three-factor design investigation for melting process of phase-change spherical capsules in a solar thermal energy storage system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 85: 111094. DOI: 10.1016/j.est.2024.111094.
- [21] LIAO Z R, CHEN P J, TIAN Z Q, et al. A modified heat capacity method for unconstrained melting inside the spherical capsule for thermal energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105479. DOI:10.1016/j.est.2022.105479.
- [22] 王晨, 崔海亭, 王超, 等. 不同U型地埋管结构跨季节相变蓄热性能[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(12): 3808-3817. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0461.
- WANG C, CUI H T, WANG C, et al. Examination of the cross-seasonal phase-change heat storage performance of different U-shaped buried pipe structures[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(12): 3808-3817. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0461.
- [23] 杨斌, 于祥京, 郑洋, 等. 管壳式相变储能换热器翅片优化模拟分析[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(4): 1394-1412. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0933.
- YANG B, YU X J, ZHENG Y, et al. Numerical analysis of fin optimization for a shell-and-tube phase change energy storage heat exchanger[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(4): 1394-1412. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0933.
- [24] JIA X J, ZHAI X Q, CHENG X W. Thermal performance analysis and optimization of a spherical PCM capsule with pin-fins for cold storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 148: 929-938. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2018.11.105.
- [25] JEONG H J, HYUN S W, KIM J H, et al. A study on the thermal performance of pipes embedded in concrete pavement for snow removal using latent heat thermal energy storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 278: 127358. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.127358.
- [26] AGEgnehu B, Liebezeit K, Fasano M, et al. Dynamic PCM for high-performance latent thermal energy storage: A numerical and parametric study[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025, 167: 109277. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109277.
- [27] WENG Z Q, LIU X Y, XU Y. Effect of different phase change materials on the thermal storage performance of a high-temperature phase change packed bed tank[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 121: 116587. DOI:10.1016/j.est.2025.116587.