



基于流-固-热三场耦合模型的不同蜂窝单元相变石蜡熔化特性

陈俊旗¹, 王明星¹, 李洁¹, 王辉²

(¹河南工业大学土木工程学院, 河南 郑州 450001; ²海南大学土木建筑工程学院, 海南 海口 570228)

摘要: 金属蜂窝结构具有轻质化、大表面积和优良的导热特性, 与相变材料结合, 能够有效克服纯相变材料热导率低的天然缺陷。为了研究不同形状蜂窝单元中相变材料的无约束熔化特性, 本工作采用等效热容法控制固-液相变过程的潜热储存, 引入 Boussinesq 假设描述浮升力驱动的液相自然对流运动, 构建了经实验验证的流-固-热三场耦合数值模型, 系统分析了三角形、菱形、矩形、六边形和圆形等5种蜂窝单元内相变石蜡的熔化过程。结果表明: 自然对流显著加速了石蜡内的热量传输, 并提升了熔化速率, 整个熔化过程中, 三角形单元内自然对流作用效果明显, 相比无自然对流熔化时间可节省92%; 单元布置方式和单元几何形态对熔化效率同样影响显著, 其中倒置三角形单元与正置布置方式相比, 平均熔化速率再次提升了38.58%; 此外, 三角形作为熔化速率最高的单元构型, 在不同的高宽比下与经典的六边形蜂窝单元相比, 分别提升了12.03%、16.56%、21.25%和16.11%; 以增强比率为判定依据, 当三角形单元的高宽比为1.0时, 其熔化速率最高, 完全熔化时间节省21.25%。

关键词: 相变材料; 蜂窝单元; 熔化速率; 高宽比; 放置方向

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0887

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 02-363-11

Melting characteristics of phase change paraffin in honeycomb cells based on a fluid-solid-heat three-field coupling model

CHEN Junqi¹, WANG Mingxing¹, LI Jie¹, WANG Hui²

(¹College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China; ²School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China)

Abstract: Metal honeycomb structures are characterized by light weight, large surface area, and excellent thermal conductivity. When combined with phase change materials (PCMs), the inherent drawback of low thermal conductivity in pure PCMs can be effectively mitigated. This study focuses on the unconstrained melting behavior of PCMs in honeycomb cells with different shapes. The effective heat capacity method is adopted to account for latent heat storage during the solid-liquid phase change process. The Boussinesq approximation is introduced to describe natural convection in the liquid phase driven by buoyancy. A fluid-solid-thermal multiphysics coupled numerical model is established and validated experimentally.

收稿日期: 2025-09-30; 修改稿日期: 2025-11-18。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12072107)。

第一作者及通信联系人: 陈俊旗 (1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为相变材料, E-mail: chenjunqi@haut.edu.cn。

引用本文: 陈俊旗, 王明星, 李洁, 等. 基于流-固-热三场耦合模型的不同蜂窝单元相变石蜡熔化特性[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(2): 363-373.

Citation: CHEN Junqi, WANG Mingxing, LI Jie, et al. Melting characteristics of phase change paraffin in honeycomb cells based on a fluid-solid-heat three-field coupling model[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(2): 363-373.

Based on the validated model, the melting processes of phase change paraffin in five types of honeycomb cells (triangular, rhombic, rectangular, hexagonal, and circular) are systematically analyzed. The results show that natural convection significantly accelerates heat transfer in paraffin and enhances the melting rate. Throughout the entire melting process, the effect of natural convection in the triangular cell is significant, reducing the total melting time by 92% compared with the case without natural convection. The cell arrangement mode and geometric shape of the cell have significant effects on melting efficiency. Specifically, the average melting rate of the inverted triangular unit is increased by 38.58% compared with that of the upright unit. In addition, as the unit configuration with the highest melting rate, the triangular unit shows improvements of 12.03%, 16.56%, 21.25%, and 16.11%, respectively, compared with the classical hexagonal honeycomb unit under different height-to-width ratios. Using the enhancement ratio as the criterion, the triangular unit achieves the highest melting rate at a height-to-width ratio of 1.0, with the complete melting time reduced by 21.25%.

Keywords: phase change material; honeycomb cell; melting rate; aspect ratio; orientation

相变材料(phase change materials, PCM)作为被动式热调控体系的关键功能材料,其高潜热存储特性与窄幅温控特性具有重要工程价值^[1]。然而,较低的热导率严重制约了其热响应效率,这已成为该材料实际应用的主要性能瓶颈。针对上述问题,目前主要采用三类强化传热策略:①引入高孔隙率介质(如金属泡沫)构建复合体系^[2];②掺入纳米级导热增强体(如石墨烯、碳纳米管)形成纳米复合相变材料^[3-6];③通过扩展传热界面(如翅片阵列、蜂窝结构)提升换热效率^[7-9]。相较于前两种方法,扩展传热面积的强化方式因其经济性优异、便于工程实施等特点,在工程应用中展现出更大应用潜力。其中蜂窝结构作为一种天然仿生材料,因其独特的轻质化特征、大比表面积和优良的导热特性,在热管理领域展现出显著优势^[10],如图1所示。

蜂窝结构复合相变材料在建筑节能、太阳能热利用、电子管热管理及冷链物流等多个领域^[11-14]具有广泛应用。研究表明,该结构不仅能有效强化传热过程,同时可实现装置的空间紧凑化设计^[15]。刘芳等^[16]指出,外部翅片可能增加封装间距,而蜂窝作为内翅片可显著提升建筑围护结构中宏观封装PCM的热性能。郭梦雪^[17]研究证实,金属骨架与石蜡的复合结构能有效强化相变传热过程,不仅提升了传热速率,还显著改善了材料内部的温度均匀性,这一特性使其在建筑节能围护结构和电子器件热管理系统中具有重要应用价值。张嘉杰等^[18]研究进一步表明,将石蜡填充至空心铝合金骨架中形成

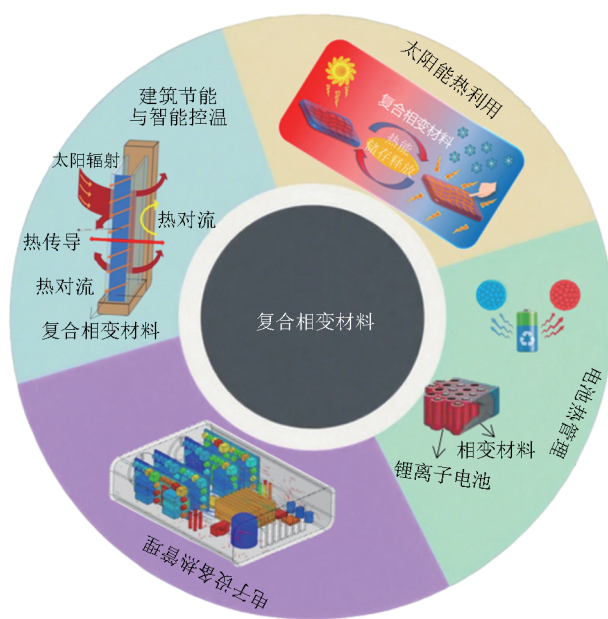


图1 复合相变材料的广泛热调节应用

Fig. 1 Wide-ranging thermal regulation applications of composite phase change materials

的复合PCM,其温控持续时间可达未填充PCM系统的2.5倍,这种优异的温度调控性能为太阳能热利用系统的储热单元设计、冷链物流的温控包装以及电子设备的热管理提供了创新解决方案。近期研究进一步揭示,PCM填充蜂窝结构不仅能通过高孔隙率实现高效储热,还可提升力学性能。如Xie等^[19]发现,形状稳定的PCM铝蜂窝复合材料具有优异的传热和力学性能组合,实验表明,金属蜂窝结构可有效增强PCM的导热性和结构强度。

如图2所示,除了六边形蜂窝结构外,还有三角形、菱形、矩形、圆形等蜂窝结构构型。Erlbeck等^[20]、Liu等^[21]和 Dhaidan等^[22]研究指出封装PCM的壳体几何形状与熔化速率密切相关,而现有研究多聚焦于六边形蜂窝构型,对其他蜂窝构

型中PCM的熔化效率研究不足。为此,本工作首先研究了有无自然对流情况下不同蜂窝单元相变石蜡无约束熔化的差异;然后考虑自然对流,探讨了蜂窝单元尺寸、形状、取向对石蜡无约束熔化效率的影响,以找到具有最佳熔化速率的蜂窝单元。

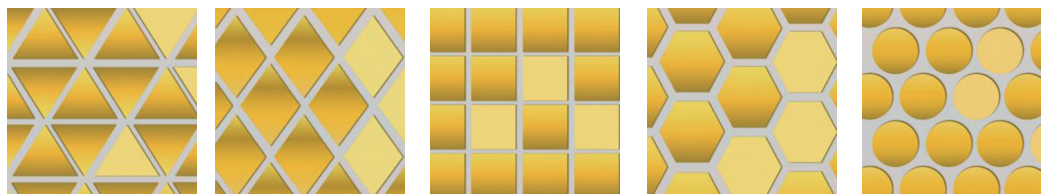


图2 不同单元形状的蜂窝结构

Fig. 2 Honeycomb structures with different cell shapes

1 几何模型

三角形、菱形、矩形、六边形和圆形等五5种蜂窝单元如图3所示,所有蜂窝单元面积为10000 mm²,蜂窝单元的特征角为 θ ,宽度为 S_x ,

高度 L_y ,高宽比为 $\lambda=L_y/S_x$,不同单元的几何参数见表1。蜂窝结构材料为铝,铝的热导率比石蜡大得多,因此,数值模拟时蜂窝单元的所有边界都设置成等温条件,初始状态蜂窝单元中PCM为固体。

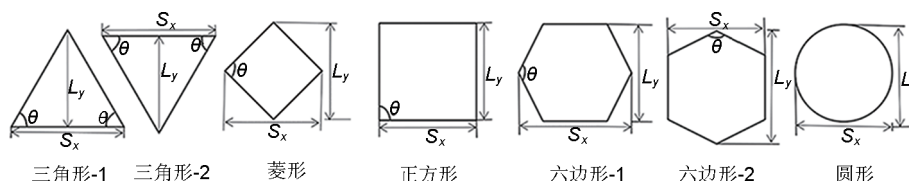


图3 不同蜂窝单元

Fig. 3 Schematic diagrams of different honeycomb cells

表1 不同蜂窝单元的几何参数

Table 1 Geometric parameters of different honeycomb cells

蜂窝单元形状	$\lambda=0.5$	$\lambda=0.866$	$\lambda=1.0$	$\lambda=1.2$
三角形-1	45°	60°	63°	67°
三角形-2	45°	60°	63°	67°
菱形	53°	82°	90°	100°
矩形	90°	90°	90°	90°
六边形-1	88°	118°	131°	132°
六边形-2	88°	118°	131°	132°
圆形	—	—	—	—

2 数值模型

石蜡的无约束熔化储能过程复杂,涉及非稳态热量传输、固/液相态转变、固/液界面移动、液相自然对流运动以及固相运动等。在数值建模时,引入连续性方程、动量方程和能量方程作为相变储能的基本控制方程。同时,采用等效热容法,将相变

材料的熔化潜热合并并在比热容中,用以控制石蜡相变过程中的热量变化。在构建熔化储能数学模型时提出以下基本假设:

- (1) 石蜡是匀质、各向同性的。
- (2) 液体石蜡的流动是层流、不可压缩的。
- (3) 石蜡的固液相性质不随温度变化而改变。
- (4) 在相变发生的固-液界面引入糊状区,在糊状区假设相变发生在一个小的温度区间 $[T_s, T_l]$ 内, T_s 和 T_l 如式(1)分别设为:

$$\begin{cases} T_s = T_m - \frac{\Delta T}{2} \\ T_l = T_m + \frac{\Delta T}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中,温度区间 $\Delta T = T_l - T_s = 1 \text{ K}$; T_m 为石蜡熔化温度, s 和 l 分别代表石蜡的固相和液相。

相变过程中的连续性方程、动量方程和能量方程分别见式(2)~式(4):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{u} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (3)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4)$$

式中, $\mathbf{u}$ 为速度矢量; ρ 为石蜡等效密度; t 为时间; P 为压力场; μ 为动力黏度; $\mathbf{F}$ 为体积力矢量; c 为石蜡等效比热容; k 为石蜡等效热导率; T 为温度场。

在动量方程式(3)中, 当温度变化引起液相的密度波动时, 液相内将产生浮升力 $\mathbf{F}$, 驱动液相的自然对流运动。浮升力 $\mathbf{F}$ 可用 Boussinesq 近似描述, 如式(5)所示:

$$\mathbf{F} = -\rho [1 - \alpha(T - T_{\text{ref}})] \mathbf{g} \quad (5)$$

式中, T_{ref} 为参考温度, 通常设为熔化温度 T_m ; α 为热膨胀系数; $\mathbf{g}$ 为重力加速度。

石蜡熔化过程中其液体分数 f 与温度场 T 有关, 可定义为:

$$f = \begin{cases} 0 & T \leq T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l \\ 1 & T \geq T_l \end{cases} \quad (6)$$

在式(3)和式(4)中石蜡的等效密度 ρ 、等效热导率 k 和等效比热容 c 如式(7)~式(9)所示:

$$\rho = (1 - f) \rho_s + f \rho_l \quad (7)$$

$$k = (1 - f) k_s + f k_l \quad (8)$$

$$c = \frac{1}{\rho} [(1 - f) \rho_s c_s + f \rho_l c_l] + L_m \frac{d\alpha_m}{dT} \quad (9)$$

式中, L_m 为熔化潜热; ρ_s 为固体石蜡密度; ρ_l 为液体石蜡密度; α_m 为质量分数, 它与液体分数 f 有关, 其表达式为:

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \frac{f \rho_l - (1 - f) \rho_s}{f \rho_l + (1 - f) \rho_s} \quad (10)$$

固相石蜡可以认为是黏度极高的液体, 因此在模拟时引入动力黏度公式, 其表达式为:

$$\mu = \mu_l \left[1 + \frac{A(1 - f)^2}{\delta + f^3} \right] \quad (11)$$

式中, μ_l 为液相石蜡的动力黏度系数; 常数 A 和 δ 通常分别取值 10^5 和 10^{-3} , 设置大常数 A 以保持固相具有足够大的动态黏度, 设置小常数 δ 以避免在 $f=0$ 时分母为零引起的不收敛。

3 有限元模型

3.1 有限元模型

基于上述控制方程组, 利用 COMSOL 多物理

场仿真平台, 构建了相变石蜡熔化蓄热过程的流-固-热多场耦合计算模型, 各计算模型的面积保持一致, 均为 10000 mm^2 。以正方形单元为例, 如图4所示, 有限元模型四周施加 $T=50^\circ\text{C}$ 的恒定温度热源。初始时, 相变石蜡的温度 $T_0=20^\circ\text{C}$, 液相石蜡在 x 、 y 方向的流速分量 $u_x=u_y=0 \text{ m/s}$, 压强 $p=101.325 \text{ kPa}$ 。对相变石蜡熔化蓄热过程进行计算时, 对流项采用二阶迎风格式离散, 间积分采用二阶克兰克-尼科尔森格式。动量方程和连续性方程采用 PIMPLE 算法求解, 该算法更易于压力和速度的耦合。本研究选用上海焦耳蜡业有限公司生产的相变温度为 $(298.15 \pm 1) \text{ K}$ 的烷烃类商用石蜡, 主要成分为 $\text{C}_{17}\text{H}_{36}$ 和 $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$ 的混合物, 其物理性能见表2。

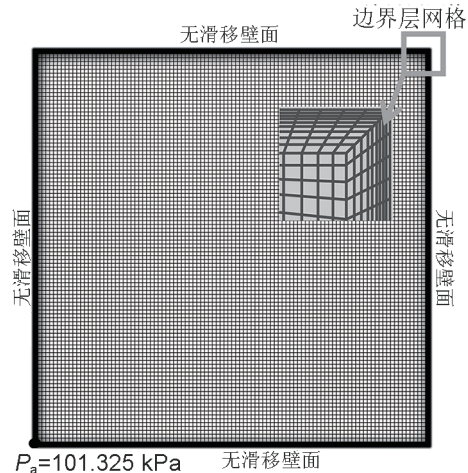


图4 相变石蜡熔化蓄热有限元模型

Fig. 4 Finite element model for melting and heat storage of phase change paraffin

表2 纯石蜡的热物理性能参数

Table 2 Thermophysical property parameters of pure paraffin

材料属性	参数	数值
熔点温度/K	T_m	300
固态密度/(kg/m^3)	ρ_s	852
液态密度/(kg/m^3)	ρ_l	842
动力黏度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	μ	0.004 94
比热容/[$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	c	3 220
热导率/[$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	k	0.2
潜热/(J/kg)	L_m	210 500
热膨胀系数/ K^{-1}	α	0.001

3.2 网格与时间步长无关性验证

如图4所示的矩形蜂窝单元, 网格尺寸分别取

0.5 mm、1 mm 和 2 mm，不同网格下的液体分数和时间关系曲线如图 5 所示。0.5 mm 和 1 mm 网格下液体分数和时间关系曲线几乎重合，故采用 1 mm 的计算网格既能满足计算精度又可节约计算时间。分别设置 0.01 s、0.05 s 和 0.1 s 三种时间步长计算，不同时间步长下的液体分数和时间关系曲线如图 6 所示。三种时间步长的计算结果重合度较高，故选择计算成本较低的 0.1 s 作为计算时间步长。

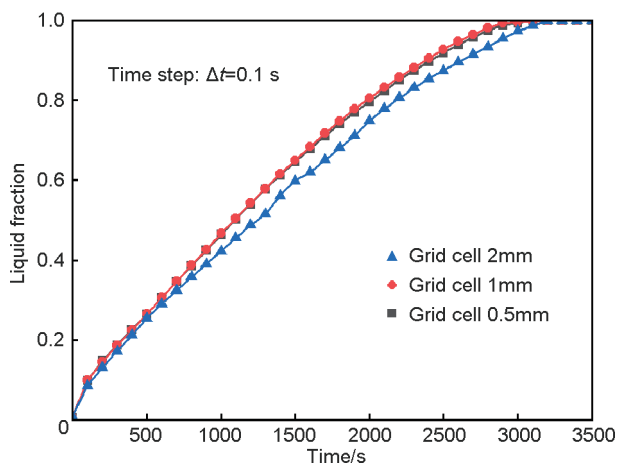


图5 网格无关性验证

Fig. 5 Grid independence analysis

3.3 计算模型验证

为了验证石蜡熔化储热计算模型的正确性，在实验室内开展了一项相变石蜡熔化储能实验。实验装置包括一个矩形容器和一个恒定温度热源，矩形容器的内部尺寸为 100 mm×100 mm×50 mm，厚度为 10 mm，由高透明有机玻璃板制成，具有良好

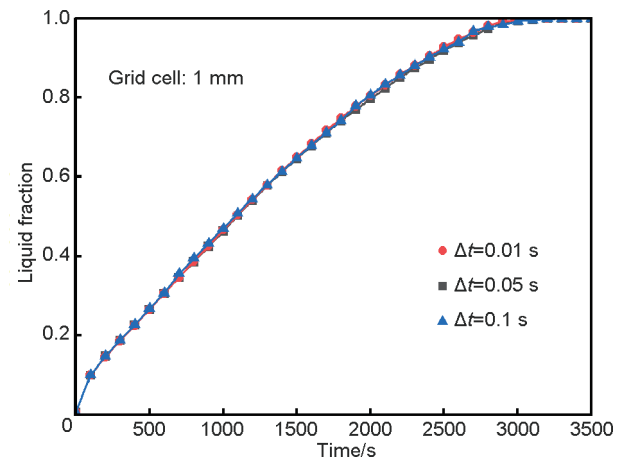


图6 时间步长无关性验证

Fig. 6 Time step independence analysis

的隔热性能。恒定温度热源通过深圳宏鑫公司定制的 220 V 硅胶加热板提供，加热板温度通过自带数显温度控制器控制，精度为±1℃。为了确保热源温度分布均匀，在硅胶加热板一侧粘贴了厚度为 2 mm 的铝板，如图 7 所示。

实验步骤如下：

- （1）容器填充：将相变石蜡填充至矩形容器中，确保容器内部无气泡且石蜡分布均匀。
- （2）初始条件设置：本次实验的初始温度为 (15±1)℃。在实验开始前，将充满石蜡的容器在实验室内静置不少于 24 h，以获得分布均匀的初始温度。
- （3）加热板温度测试：在加热板启动之前，使用 K 型热电偶对加热板的四周进行温度测量。将热电偶均匀布置在加热板的各个区域，确保测试点覆盖加热板的四周。记录各测试点的温度值，确保加

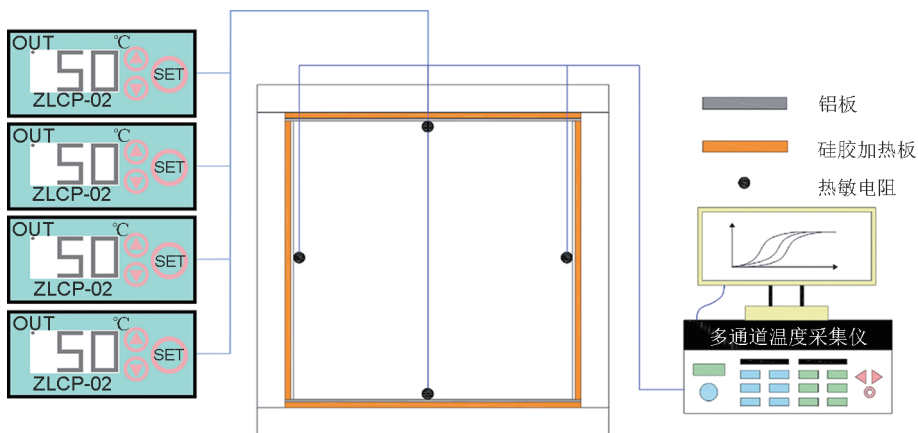


图7 相变石蜡熔化实验装置

Fig. 7 Melting test setup of phase change paraffin

热板的温度分布均匀,偏差在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 范围内。如果发现温度分布不均匀,需调整加热板的位置或温度控制器的设置,直至满足实验要求。

(4) 加热启动:将恒定温度热源放置于容器的四边,确保热源与容器接触良好,启动加热过程。

(5) 影像记录:每隔5 min使用数码相机对石蜡熔化前缘拍照,记录熔化过程的形态变化。

(6) 将记录的照片导入ImageJ软件,依据图像处理技术中的像素点区分固、液两相区域,采用软件自带的面积计算器计算固相区域面积和液相面积,分别记录为 $A_{\text{固}}$ 、 $A_{\text{液}}$ 。液体分数为相变材料液相区所占总面积的比例,可依据式(12)进行计算:

$$f = \frac{A_{\text{液}}}{A_{\text{液}} + A_{\text{固}}} \times 100\% \quad (12)$$

图8为实验与数值模拟的液体分数-时间曲线对比,可见在前1000 s数值计算的熔化速率与实验值吻合得很好,之后模拟和实验之间会出现一些偏差,整个熔化过程的液体分数误差小于5%。图9为方腔内相变石蜡熔化前锋演化过程中的实验和数值结果对比,蓝色和红色分别表示PCM的固相和液相。从图9中可以看出,不同液体分数下实验结果与数值模拟的熔化前锋形态吻合良好。在熔化初期,液膜层厚度随着熔化时间的持续加厚,最高约

0.5 mm。随着熔化的持续,当相变石蜡失去四周边界的约束作用后,因固相石蜡密度大于液相石蜡,固相区域将下沉至方腔底部,挤压底部液相区,使得液膜厚度始终保持在极薄厚度,直至完全熔化。需要注意的是,极薄厚度的液膜不易被观测,只能通过边界色差判断出其存在。如图9所示,对底部液膜层进行局部放大处理,方便观察底部液膜区域信息。

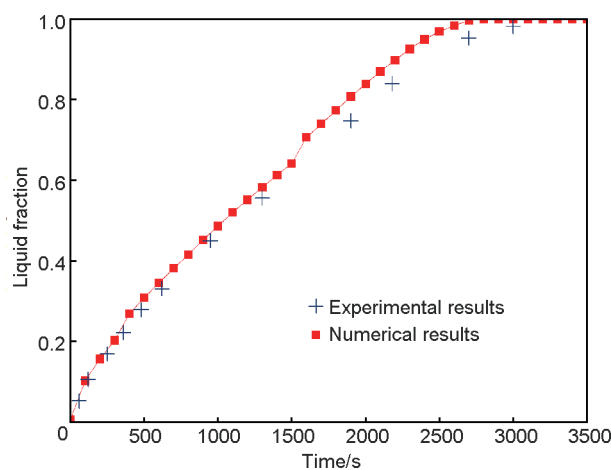


图8 实验与数值计算液体分数-时间曲线对比

Fig. 8 Comparison of liquid fraction-time curves between experimental data and numerical simulation

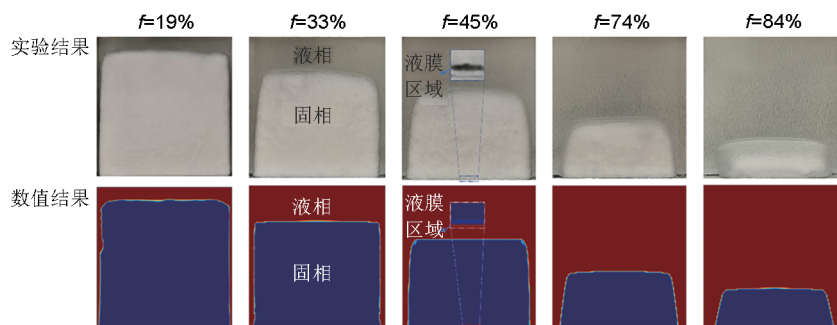


图9 相变石蜡熔化前锋演化的实验和数值结果的比较

Fig. 9 Comparison of experimental and numerical results of melting front in phase change paraffin

4 结果和讨论

4.1 自然对流对熔化过程的影响

为了分析自然对流对熔化过程的影响,计算得到高宽比为1时不同蜂窝单元内相变材料熔化过程中的温度场与液体分数分布云图,结果如图10所示。可知,当忽略液相自然对流运动时,相变石蜡的熔化过程由热传导控制,且相变石蜡的熔化边界始终与蜂窝单元形状保持一致。通过对比无对流条件下900 s和1800 s时刻熔化边界轮廓,发现单一热传导驱动的

相变石蜡熔化边界进展缓慢。当考虑液相自然对流的影响时,相变石蜡熔化初期依旧由热传导所控制,随着熔化时间推移,固相石蜡失去边界的约束将下沉至蜂窝底部,而液相石蜡内在温度梯度引起的浮升力驱动下产生自然对流运动,对流强度随着熔化持续而逐渐加剧,形成的循环涡流将热量快速运至熔化边界处,从而显著提升了相变石蜡的熔化速率。对比900 s和1800 s时刻云图结果,不规则的石蜡熔化边界形态正是自然对流传热作用所引起的,且自然对流作用下的固相石蜡体积要明显小很多。

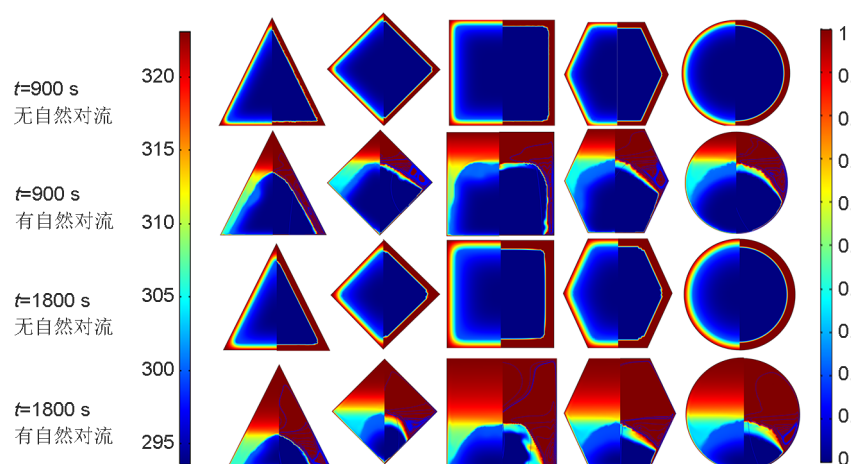


图10 自然对流存在/缺失条件下不同蜂窝单元的温度场与液相分布云图

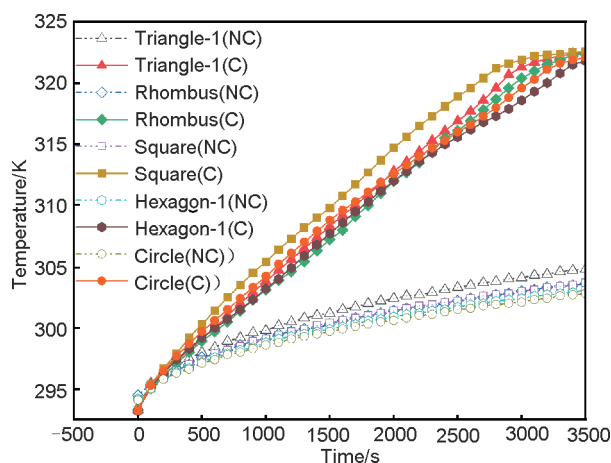
Fig. 10 Contour plots of temperature field and liquid phase distribution in different honeycomb cells with/without natural convection

图11(a)为有、无自然对流条件下的相变材料在熔化过程中温度平均值随时间的变化规律。结果表明相变材料在自然对流(C)下的温度提升速率明显高于无自然对流(NC)情况。其原因为,无对流时热量以热传导的形式向内部运输,逐步减小的温度梯度将削弱热量传输效果。与之相反,自然对流运动可实现热量的快速无障碍传播,导致石蜡升温速度更快。由图11(b)所示液体分数随时间变化曲线结果可知,相变石蜡在自然对流下完全熔化所需时间远小于无自然对流情况,例如,考虑自然对流时三角形蜂窝单元内相变石蜡完全熔化时间约为2700 s,无自然对流时熔化时间达到34750 s,自然对流传热可使熔化时间节省达92%。可见,自然对流对相变石蜡的熔化过程起到了显著的提升作用,其作用效果不可忽略。

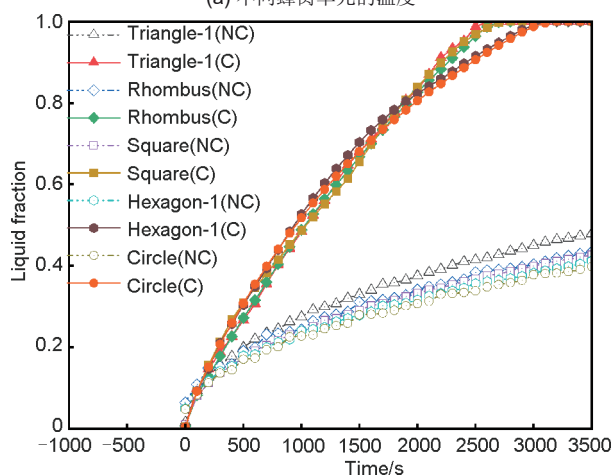
4.2 蜂窝单元形状对熔化过程的影响

为了分析蜂窝单元形状对熔化过程的影响,考虑自然对流作用效果,计算得到三角形、菱形、矩形、六边圆形等不同形状蜂窝单元内相变石蜡熔化过程中的温度、液体分数、对流速度等变量与熔化时间的关系曲线,结果如图12所示,其中各蜂窝单元高宽比为1。

由图12可知,在熔化初期,温度-时间、液体分数-时间、对流速度-时间等关系曲线基本处于重合状态,表明此时的热量传输主要由热传导所控制,而自然对流的影响基本可忽略不计。随着熔化时间的增加,不同单元中的PCM温度和对流速度逐渐呈现差异性。如图12(a)所示,正方形单元的



(a) 不同蜂窝单元的温度



(b) 不同蜂窝单元的液体分数

图11 有无自然对流时不同蜂窝单元温度和液体分数的比较

Fig. 11 Comparison of temperature and liquid fraction in various honeycomb cells with/without natural convection

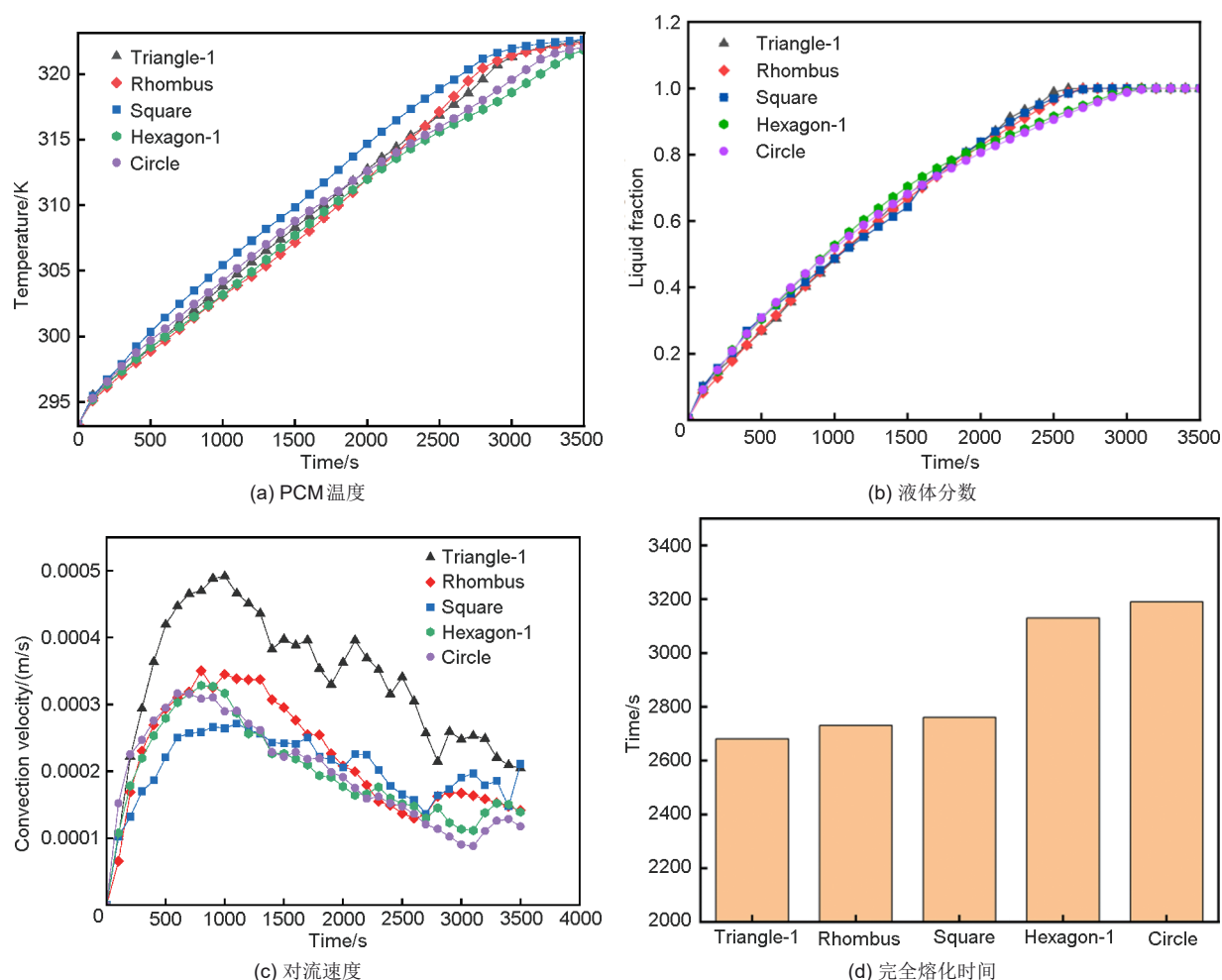


图 12 不同蜂窝单元结构对相变材料熔化特性的影响

Fig. 12 Effects of honeycomb geometries on PCM melting characteristics

PCM 熔化温度随时间增加得最快。如图 12(c)所示, 三角形-1 单元在熔化过程中对流速度最大, 而六边形和圆形的对流效果最差。对流速度作为评价自然对流传热效果的指标, 其值越大反映自然对流的效果越明显, 这有利于液体石蜡的流动和热交换, 进而缩短熔化时间。表 3 为不同单元形状的内切圆半径, 三角形的内切圆半径最小, 意味着结构的边角越尖锐, 加热边界与石蜡的接触面积可能更大, 使得热流能更快速地穿透石蜡内部, 从而加速熔化。由图 12(c)、(d)可知, 三角形的熔化时间是所有形状蜂窝单元内最短的, 且在熔化过程中具有最大的对流速度。由此可认为, 蜂窝单元的形状会影响 PCM 的熔化效率, 其中三角形为最优蜂窝单元形状。

4.3 蜂窝单元取向对熔化过程的影响

由于液相密度差产生的浮升力具有方向性, 使

表 3 不同单元形状的内切圆半径

Table 3 The inscribed circle radii of different unit cells

结构单元形状	三角形	菱形	正方形	六边形	圆形
内切圆半径/mm	47	50	50	52	56

得蜂窝单元的取向对 PCM 的熔化速率也会产生一定影响。考虑自然对流运动, 计算得三角形和六边形两种蜂窝单元不同取向时的液体分数分布云图, 结果如图 13 所示。通过对比发现, 在初始热传导主控阶段, 输入热量只与边界周长相关, 不同单元取向的熔化过程差异性并不明显, 但随着熔化过程的持续, 单元取向的影响越发凸显, 如图 14 所示。

如图 14 所示, 自 $t=400$ s 起, 倒置三角形中相变石蜡的熔化速率开始快于正置三角形, 原因在于较大的倾斜热接触显著提升了自然对流的形成与作用效果。在重力作用下, 下沉固相石蜡不仅与热壁

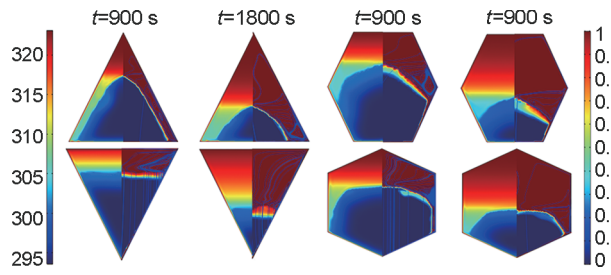
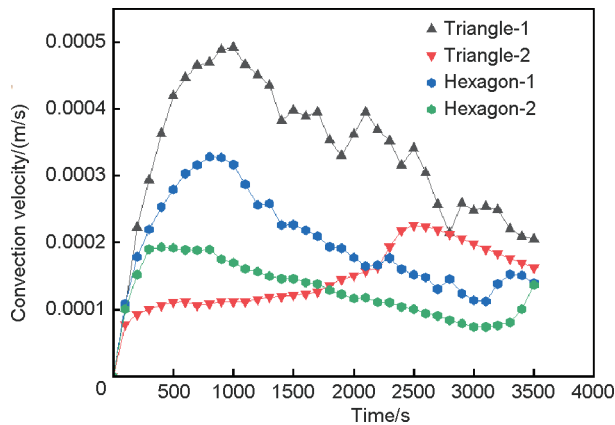
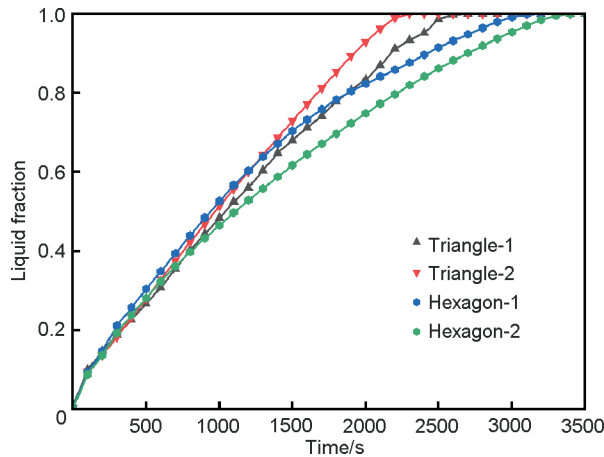


图13 蜂窝结构单元取向对温度场与液相分布的影响

Fig. 13 Temperature field and liquid phase distribution under different honeycomb cell orientations



(a) 对流速度



(b) 液体分数

图14 蜂窝结构单元取向对相变材料熔化过程中对流速度与液相分数的影响

Fig. 14 Effects of honeycomb cell orientation on convection velocity and liquid fraction during PCM melting

的接触面积变得更大，提升了热传导传热速率，同时又因对液相的持续挤压作用而提升了自然对流传热效率，两种传热模式的共同提升加大对熔化边界

的热冲刷效果，促进相变材料的熔化进程。最终，倒置三角形中石蜡完全熔化时间比正置三角形缩短38.58%。与之类似，六边形-1中石蜡熔化亦快于六边形-2。

4.4 单元高宽比对熔化速率的影响

为了进一步分析蜂窝单元高宽比对熔化速率的影响，计算得三角形、菱形、矩形、六边形及圆形蜂窝单元中相变石蜡在4种不同高宽比(0.5、0.866、1.0、1.2)情况下的总熔化时间，结果如图15所示。结果表明，三角形与矩形单元的熔化效率均显著高于六边形和圆形单元。由此可知，几何构型的优化选择需综合考虑单元尺寸、布置方向及高宽比等参数的影响。然而，以三角形蜂窝单元为例，在实际构造阵列蜂窝结构时，三角形-1与三角形-2单元会成对相邻伴存，需考虑其平均熔化速率。而其他蜂窝构型的单元形状和放置方向保持一致，可考虑一个单元的熔化速率。以此计算的三角形、菱形、矩形及圆形等单元相较于六边形-1的熔化时间节省率，结果见表4。在4种不同高宽比下，组合三角形单元展现出最优的熔化性能，当高宽比分别为0.5、0.866、1.0和1.2时，其最大时间节省率分别提升了12.03%、16.56%、21.25%和16.11%。此外，为了量化熔化效率增强的过程性，以六边形-1单元为对比基础，提出式(13)所示的增强比：

$$E_i(t) = \frac{f(t) - f_{\text{hex}}(t)}{f_{\text{max}}} \times 100\% \quad (13)$$

式中， f_{max} 为1.0， $f_{\text{hex}}(t)$ 为六边形-1单元中PCM的瞬时液体分数， $f(t)$ 为不同蜂窝单元中PCM的瞬时液体分数，其中三角形的PCM瞬时液体分数为三角形-1和三角形-2单元中PCM瞬时液体分数的平均值。

采用式(13)计算得高宽比为1时三角形、菱形、正方形和圆形与六边形-1单元相比的液体分数的增强比，结果如图16所示。由此可知，在单元面积相同时，六边形-1具有更大的周长，在1000 s之前热传导起主要作用，三角形、菱形、正方形熔化速率小于六边形-1。随着熔化进程的推进，自然对流作用愈加显著，不同单元中的对流强度不同，三角形、菱形和正方形的熔化速率分别在1000 s、1200 s和1400 s之后超过六边形，并且三角形单元熔化速率明显高于菱形和正方形单元。

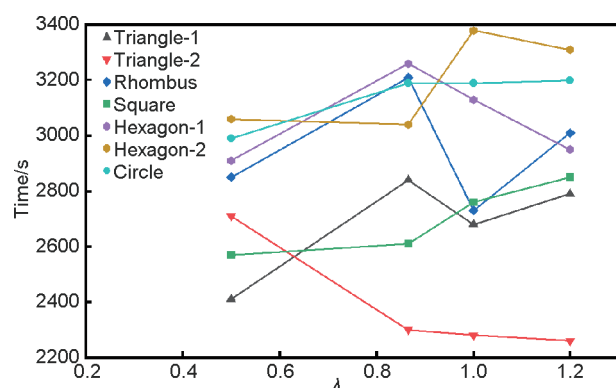


图15 不同纵横比蜂窝单元内石蜡相变时间的对比分析
Fig. 15 Comparative analysis of paraffin phase transition duration in honeycomb cells with four aspect ratios

表4 六种蜂窝单元结构相较六边形-1单元的时间节省率

Table 4 Time-saving rates of six honeycomb configurations relative to the reference hexagonal-1

蜂窝单元形状	高宽比 λ			
	0.5	0.866	1	1.2
三角形-1	17.18%	7.79%	14.38%	7.30%
三角形-2	6.87%	25.32%	28.12%	24.92%
三角形组合	12.03%	16.56%	21.25%	16.11%
菱形	2.06%	1.89%	12.78%	-3.32%
矩形	11.68%	15.26%	11.82%	5.32%
六边形-2	-4.92%	5.84%	-7.98%	-9.97%
圆形	-2.65%	3.57%	-1.92%	-6.31%

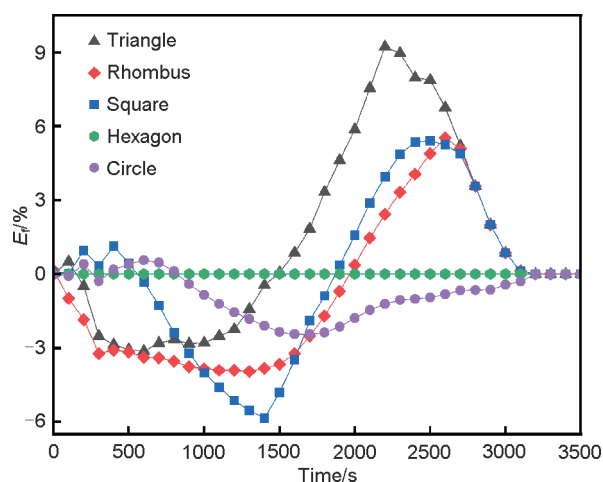


图16 不同蜂窝芯与六边形-1单元相比的液体分数增强比
Fig. 16 Liquid fraction enhancement ratio of various honeycomb cells relative to hexagonal benchmark

5 结论

针对不同形状蜂窝单元内相变石蜡的无约束熔化过程开展研究,探讨了自然对流、单元形状、取

向及高宽比对熔化效率的影响,主要结论如下:

(1) 自然对流能够显著增强蜂窝单元内PCM的温升和熔化速率,相较于纯热传导条件,熔化时间明显缩短。

(2) 蜂窝单元的几何形状对熔化效率影响显著。在熔化初期热传导占主导时,矩形单元的熔化速率快于六边形单元;随着自然对流增强,三角形和菱形单元逐渐展现出更高的熔化效率。

(3) 单元的几何布置会显著影响对流换热,从而影响熔化速率,以三角形为例,倒置布置可使熔化时间缩短14.93%。

(4) 蜂窝单元的高宽比对熔化行为有一定影响。在高宽比为0.5、0.866、1.0和1.2的条件下,三角形蜂窝结构整体表现最优,相较六边形单元熔化时间节省15.46%~26.17%。

参考文献

- [1] 刘伟,李振明,刘铭扬,等. 高温相变储热材料制备与应用研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(2): 398-430. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0521.
- LIU W, LI Z M, LIU M Y, et al. Review of high-temperature phase change heat storage material preparation and applications[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(2): 398-430. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0521.
- [2] 代建龙,李果,曹一通,等. 多孔金属泡沫强化石蜡相变蓄热性能[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(11): 3764-3771. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0449.
- DAI J L, LI G, CAO Y T, et al. Enhancing phase change heat storage performance of paraffin using porous metal foam[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(11): 3764-3771. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0449.
- [3] KAMKARI B, SHOKOUHMAND H. Experimental investigation of phase change material melting in rectangular enclosures with horizontal partial fins[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 78: 839-851. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.056.
- [4] 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. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.003.
- [5] MAHDI J M, LOHRASBI S, GANJI D D, et al. Accelerated melting of PCM in energy storage systems via novel configuration of fins in the triplex-tube heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 124: 663-676. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.095.
- [6] JI C Z, QIN Z, DUBEY S, et al. Simulation on PCM melting enhancement with double-fin length arrangements in a

- rectangular enclosure induced by natural convection[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 255-265. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.118.
- [7] LI Y, GUO B, HUANG G F, et al. Characterization and thermal performance of nitrate mixture/SiC ceramic honeycomb composite phase change materials for thermal energy storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 81: 193-197. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.02.008.
- [8] EGOLF P W, AMACKER N, GOTTSCHALK G, et al. A translucent honeycomb solar collector and thermal storage module for building façades[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 781-795. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.111.
- [9] HASSE C, GRENET M, BONTEMPS A, et al. Realization, test and modelling of honeycomb wallboards containing a phase change material[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(1): 232-238. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.09.017.
- [10] LIU F, WANG J F, LIU Y Q, et al. Natural convection characteristics of honeycomb fin with different hole cells for battery phase-change material cooling systems[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51: 104578. DOI: 10.1016/j.est.2022.104578.
- [11] 邓雅军, 卞瑞豪, 王文昭, 等. 太阳能热发电的多级蓄热技术研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(13): 5179-5187. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.13.003.
- DENG Y J, BIAN R H, WANG W Z, et al. Review on multi-stage thermal storage systems for solar power generation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(13): 5179-5187. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.13.003.
- [12] 吴延鹏, 刘乾隆, 田东民, 等. 相变材料与热管耦合的电子器件热管理研究进展[J]. *化工学报*, 2023, 74(S1): 25-31. DOI: 10.11949/0438-1157.20230069.
- WU Y P, LIU Q L, TIAN D M, et al. A review of coupling PCM modules with heat pipes for electronic thermal management[J]. *CIESC Journal*, 2023, 74(S1): 25-31. DOI: 10.11949/0438-1157.20230069.
- [13] 董菲菲, 卫宽宽. 绿色建筑能源的循环利用[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(3): 949-951. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0133.
- DONG F F, WEI K K. Research on the recycling of green building energy[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(3): 949-951. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0133.
- [14] 谢鹏, 蔡振豪, 罗睿林, 等. 基于金属相变材料储热的严寒地区电动客车热管理系统研究[J]. *汽车工程*, 2025, 47(8): 1546-1558. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2025.08.011.
- XIE P, CAI Z H, LUO R L, et al. Research on thermal management system of electric buses for extreme cold regions based on thermal energy storage with metallic phase change material[J]. *Automotive Engineering*, 2025, 47(8): 1546-1558. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2025.08.011.
- [15] SEETOH I P, JOVIN D, LAI C Q. Effect of geometrical design on the latent heat cooling properties of a lightweight two-phase composite[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(14): 141908. DOI: 10.1063/5.0065433.
- [16] 刘芳, 杨志鹏, 袁卫星, 等. 电子芯片散热技术的研究现状及发展前景[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(23): 163-169. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.23.022.
- LIU F, YANG Z P, YUAN W X, et al. Research status and development prospect of the chip cooling technologies[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(23): 163-169. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.23.022.
- [17] 郭梦雪. 含金属骨架石蜡融化传热特性实验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.
- GUO M X. Experimental study on heat transfer characteristics of paraffin melting with metal framework[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020.
- [18] 张嘉杰, 屈治国, 马素霞, 等. 空心铝合金结构填充相变材料的换热特性[J]. *化工学报*, 2017, 68(5): 1845-1851. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20161417.
- ZHANG J J, QU Z G, MA S X, et al. Heat transfer performance of hollow aluminium structure filled with PCM[J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(5): 1845-1851. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20161417.
- [19] XIE B, CHENG W L, XU Z M. Studies on the effect of shape-stabilized PCM filled aluminum honeycomb composite material on thermal control[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 91: 135-143. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.108.
- [20] ERLBECK L, SCHREINER P, SCHLACHTER K, et al. Adjustment of thermal behavior by changing the shape of PCM inclusions in concrete blocks[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 158: 256-265. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.12.073.
- [21] LIU Z X, YU Z, YANG T T, et al. A review on macro-encapsulated phase change material for building envelope applications[J]. *Building and Environment*, 2018, 144: 281-294. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.08.030.
- [22] DHAIDAN N S, KHODADADI J M. Melting and convection of phase change materials in different shape containers: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 43: 449-477. DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.017.