



金属翅片对相变材料熔化储热速率的强化机理研究

钱春枝¹, 陈渝², 赵锡佳², 曹世豪²

(¹郑州理工职业学院建筑工程学院, 河南 郑州 451150; ²河南工业大学土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为系统研究金属翅片对相变材料熔化储热过程的影响, 本研究采用3D打印技术制备了集成加热底板的铝合金翅片结构, 并将其嵌入正十八烷构成复合相变材料单元。开展底部恒温条件下的熔化试验, 测试熔化边界发展规律。同时, 采用COMSOL有限元软件建立了金属翅片/正十八烷熔化储热计算模型, 并以试验测试数据验证模型的正确性。在此基础上, 模拟分析了翅片高度、翅片梯度、翅片数目、分散模式以及翅片材料等参数对熔化性能的影响。结果表明, 金属翅片通过增大传热面积、引导热量定向传递及改变熔化模式等机制, 显著提升了储热速率。储热速率随翅片高度增加呈先增后饱和趋势, 25 mm为最优高度。翅片梯度对熔化速率的影响可忽略不计。分散翅片可进一步强化传热, 其效果随翅片数目增加呈先增强后减弱的现象, 在数目为5时达到最优。进一步将均匀分布的5a模式优化为非均匀的0.5a+4a+0.5a模式, 可使储热速率再提升8%, 较纯相变材料提升260%, 为本研究中的最佳分布构型。此外, 在常用的SLM金属3D打印材料中, 纯铜凭借其高导热系数, 对熔化速率的提升最为显著, 其熔化速率较铝合金提高了40.57%。

关键词: 金属翅片; 相变材料; 熔化过程; 储热速率; 结构优化

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0927

中图分类号: TK 114

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 04-1185-11

Enhancement mechanism of three-dimensional-printed metal fins for the melting and heat-storage performance of phase-change materials

QIAN Chunzhi¹, CHEN Yu², ZHAO Xijia², CAO Shihao²

(¹Institute of Civil Engineering, Zhengzhou Institute of Technology, Zhengzhou 451150, Henan, China;

²College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: To systematically investigate the impact of metal fins on the melting kinetics and heat-storage behavior of phase-change materials (PCMs), aluminum-alloy fins were integrated with a heated baseplate via selective laser melting (SLM) three-dimensional (3D) printing. Thereafter, these additively manufactured structures were embedded in n-octadecane to construct composite PCM units. Melting experiments were conducted via constant-temperature bottom heating to track the melting-front evolution. Concurrently, a numerical model of the metal fin/n-octadecane melting and heat-storage processes was

收稿日期: 2025-10-20; 修改稿日期: 2025-11-10。

基金项目: 河南省科技攻关项目 (242102240026), 河南省粮油仓储建筑与安全重点实验室项目 (2024KF08)。

第一作者: 钱春枝 (1987—), 女, 讲师, 从事增强相变潜热储能技术研究, E-mail: 434939924@qq.com; 通信作者: 曹世豪, 博士, 副教授, 从事增强相变潜热储能技术研究, E-mail: shcao@haut.edu.cn。

引用本文: 钱春枝, 陈渝, 赵锡佳, 等. 金属翅片对相变材料熔化储热速率的强化机理研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(4): 1185-1195.

Citation: QIAN Chunzhi, CHEN Yu, ZHAO Xijia, et al. Enhancement mechanism of three-dimensional-printed metal fins for the melting and heat-storage performance of phase-change materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(4): 1185-1195.

developed using COMSOL Multiphysics, and its accuracy was validated via a comparative analysis with experimental results. Leveraging the validated model, the effects of the metal-fin height, gradient, number, distribution pattern, and material on the overall melting kinetics were analyzed through simulations. Results reveal that the 3D-printed metal fins significantly enhanced the heat-storage rate by expanding the effective heat-transfer area, directing heat flow, and altering the morphological evolution of the melting front. The heat-storage rate increased with the increasing fin height before reaching a saturation point, with the optimal height identified as 25 mm. Fin gradient exerted a negligible effect on the melting rate. Distributed fins further enhanced heat transfer, with the melting rate increasing at first before decreasing as the number of fins increased, reaching an optimum at five fins. Further optimization of the uniform $5a$ baseline into a non-uniform $0.5a+4a+0.5a$ configuration improved the heat-storage rate by an additional 8%, representing a 260% thermal enhancement over pure PCM, making it the most effective fin distribution in this study. Among conventionally employed SLM-compatible 3D-printed metallic materials, pure copper exerted the most significant enhancement effect on the melting rate owing to its high thermal conductivity, imparting a 40.57% enhancement compared with the aluminum-alloy variant.

Keywords: metal fins; phase change material; melting process; thermal storage rate; structural optimization

相变材料因在相变过程中近似恒温的储热特性,成为理想的热管理介质,可有效缓解热能供给与需求在时间和空间上的不匹配问题,在应对全球能源挑战和服务于中国“双碳”战略方面具有重要潜力^[1-2]。目前,已知的天然与合成相变材料已达数千种,按其相变温度可划分为低温(小于 288.15 K)、中温(288.15~353.15 K)、中高温(353.15~473.15 K)及高温(大于 473.15 K)四类。其中,烷烃、脂肪酸等中低温有机相变材料因化学稳定性好、无腐蚀性及循环寿命长等优点,被广泛应用于建筑节能、电子设备热管理、太阳能光热系统及医疗热疗等领域^[3-6]。然而,这类材料普遍存在导热系数低的固有缺陷,这已成为制约其实际应用的主要技术瓶颈与核心性能挑战。

为弥补这一缺陷,研究人员已提出多种导热增强技术以提升其熔化储热速率。文献[3,7-8]通过引入碳纳米管、石墨烯、膨胀石墨等高导热纳米填料,在相变基体中构建导热网络,使传热速率提升数十倍。另有研究采用金属泡沫或多孔陶瓷封装相变材料,在提高导热性能的同时有效抑制了液相泄漏^[9-10]。然而,多孔结构在一定程度上限制了液相的流动空间,导致热传导增强与自然对流传热之间形成竞争关系,其综合强化效果常低于预期^[11]。从

系统设计角度出发,在相变材料容器中嵌入金属翅片可显著增大传热面积,从而提升整体热交换效率^[12-13]。与纳米填料及金属泡沫等强化技术相比,金属翅片不仅成本较低、工艺成熟,还能在相变材料熔化过程中充分利用并增强液相自然对流,实现传导与对流的协同强化。

本研究围绕金属翅片对相变材料熔化储热速率的强化机理,结合实验与系统数值模拟开展研究。首先设计铝合金翅片/正十八烷复合相变材料熔化储热试验,测试高导热翅片对熔化过程的影响规律。其次,建立复合相变材料的熔化储热计算模型,以试验测试结果验证其正确性,并进一步系统分析翅片高度、梯度、数目、材料以及分散模式等参数对熔化储热性能的影响。最后,基于参数分析结果对翅片构型进行优化,提出了最佳分布方案。研究结果可为高效相变储热系统的结构与性能优化提供理论依据。

1 熔化储热试验

1.1 试验装置

为了测试金属翅片对正十八烷熔化储热过程的影响,本研究设计了如图1所示的铝合金翅片/正十八烷两相复合材料熔化储热试验。试验装置由①高

精度恒温水槽、②U型循环水箱、③高透明亚克力方腔、④高导热铝合金翅片、⑤正十八烷相变材料、⑥聚氨酯隔热板、⑦多路温度采集仪、⑧电脑以及数码相机、高精度恒温箱等构成。高精度恒温水槽型号为蚁博士 MDC-0510N，精度为 ± 0.1 K，试验温度设置为 333.15 K。U型亚克力水箱通过与恒温水槽的外循环相连接构成循环水浴加热系统。值得注意的是，U型循环水箱的两侧进、出水阀门口高于翅片底座传热底板约 10 mm，此设计利用重力与流体路径引导，可使循环水路中的气泡自然集聚于两侧端口处，从而有效避免其在传热底板表面附着形成气隙热阻，使得传热底板温度分布更加均匀。高导热金属翅片尺寸为 25 mm \times 10 mm \times 1 mm，底座为 200 mm \times 100 mm \times 2 mm 的矩形板，采用中瑞科技 iSLM280 型 3D 打印机一次整体成型制备，见图 1(b)。底座下表面与 U 型循环水箱采用耐高温环氧树脂胶粘连，上表面凹槽设计增强了亚克力方腔与传热底板之间的黏接强度，有效防止了在长期热循环中因材料热膨胀系数不匹配而导致的界面开裂泄漏问题。此外，方腔内翅片底座高出外部约 1 mm，避免了胶黏剂对初始熔化界面观测视场的遮挡，确保了试验图像采集的清晰与准确。亚克力方腔内部尺寸为 50 mm \times 42.9 mm \times 10 mm，厚度为 10 mm，顶部附带一可拆卸的盖子。方腔内灌注正十八烷相变材料，灌注深度为 30.9 mm。亚克力方腔外部覆盖一层厚 10 mm 的聚氨酯隔热板，以减少试验过程中的热量损失。路温度采集仪型号为优利德 UT3208，精度为 ± 0.1 K，用于实时监测传热底板的温度稳定性、相变材料熔化过程中的温度变化规律。数码相机用于拍照记录相变材料的熔化过程。其中②U型循环水箱、③高透明亚克力方腔、④高导热铝合金翅片以及⑤正十八烷相变材料四部分构成了可拆卸的核心储能部件，见图 1(b)。

1.2 试验步骤

试验开始前，将图 1(b)中核心储能部件与高精度恒温水槽连接，并将水槽温度设定为 293.15 K，低于正十八烷熔点温度(301.15 K)。通过多路温度采集仪配套的 K 型热电偶实时监测水槽温度，待其稳定在设定值后，将已熔化的液态正十八烷注入亚克力方腔内，灌注高度控制为 30.9 mm。随后，方腔内正十八烷在底部低温冷却下自下而上凝固，该

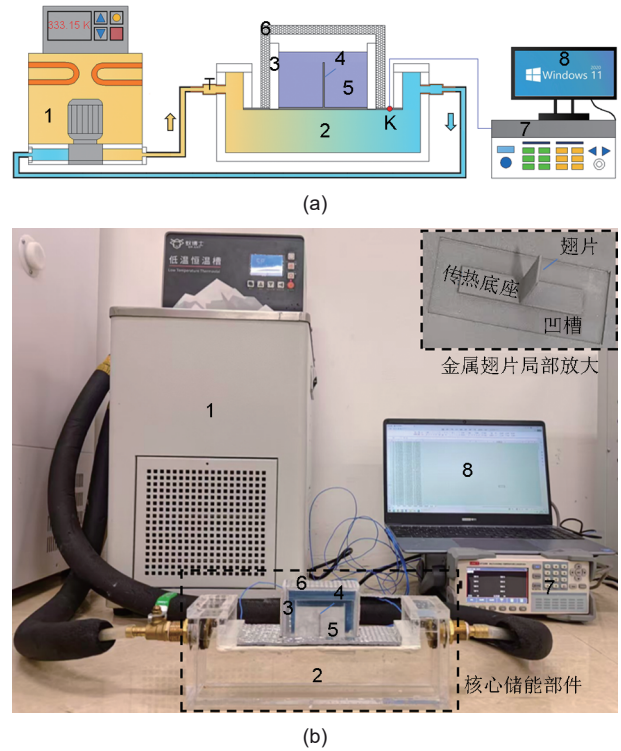


图1 相变材料熔化试验装置：(a) 示意图；(b) 现场照片
Fig. 1 Experimental setup for the melting of PCM:
(a) Schematic diagram; (b) photograph of the experimental setup

过程有助于抑制因正十八烷固、液两相密度差所导致的内部缩孔缺陷。待正十八烷完全凝固后，将核心储能部件转移至高精度恒温箱内，型号为力辰科技 SHHB-D6000，精度为 ± 1 K，温度设置为 293.15 K，冷却时间不少于 24 h，从而确保相变材料内部形成均匀的初始温度条件。之后，将高精度恒温水槽温度调整为 333.15 K，待其温度稳定后，迅速将核心储能部件从恒温箱中取出并连接水槽，随即启动熔化试验测试。试验过程中，采用数码相机以 1 min 为间隔定时拍照记录熔化边界演化过程。温度数据实时传输保存至计算机中，供后续分析使用。

1.3 试验结果及分析

图 2 为试验拍照记录的熔化边界形态演化过程，图中参数 θ 为相变材料熔化分数，该参数通过对试验过程中定时拍摄的照片进行图像处理确定。首先，将试验照片导入 ImageJ 软件，依据图像灰度阈值识别熔化边界，并区分固、液二相；随后，通过面积计算功能分别获取固相区域面积 A_s 和液相区域面积 A_l ；最终，依据式(1)计算液相区域面积占总相变材料区域面积的比例，即为熔化分数 θ 。

$$\theta = \frac{A_l}{A_s + A_l} \quad (1)$$

式中, θ 为熔化分数, $\theta=1$ 表示完全熔化; A_s 为固相区域面积; A_l 为液相区域面积。

由图2可知, 在 $\theta=0.061$ 的熔化初始阶段, 底部熔化界面基本保持水平, 且金属翅片周边仅有底部区域出现少量熔化液相, 表明该阶段热量传递以热传导为主导。当熔化进行至 $\theta=0.124$ 时, 底部原本水平的熔化界面开始出现微小波动, 同时竖直方向的熔化界面形态呈现为光滑弯曲, 这标志着自然对流传热机制开始发挥作用。此时, 底部区域将会产生若干阵列状的热羽流, 并在翅片两侧形成对称

的环流, 该流动结构在后续数值模拟中得到了清晰再现。随着熔化过程继续, 底部相邻羽流将逐步合并为更大尺度的环流, 导致熔化界面形态趋于不规则。同时, 可以观察到翅片顶部的熔化速率逐渐超过底部, 这是由竖向液相区内形成的大环流热冲刷所引起的, 且该环流强度随液相区扩展而不断增强。至 $\theta=0.627$ 时, 翅片顶部区域的相变材料已完全熔化, 剩余固相区域被底部与侧向高温液相所包围, 熔化模式由单一底边主导转变为两侧共同作用。在此之后, 受大尺度环流影响, 顶部区域的熔化持续快于底部, 直至相变材料全部熔化完毕。整个熔化过程总计持续约24 min。

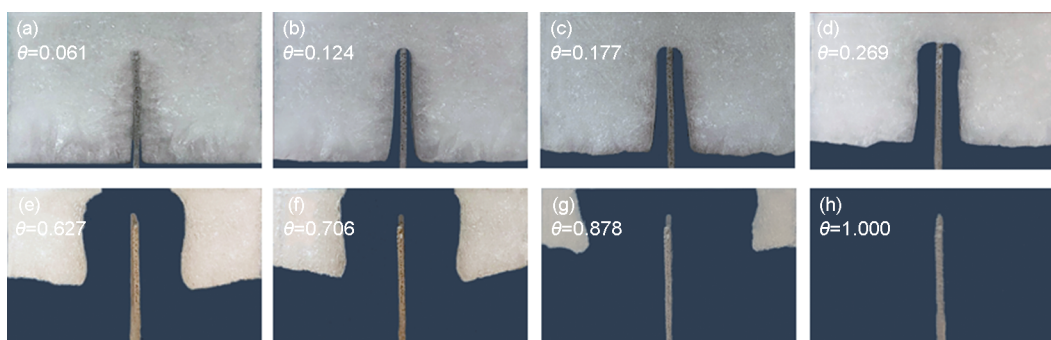


图2 试验测试的熔化边界形态

Fig. 2 Experimental melting front morphology

2 熔化储热计算模型

2.1 计算模型

采用 COMSOL Multiphysics 5.3a 有限元软件中的流体传热模块, 建立了金属翅片/正十八烷复合相变材料的熔化储热计算模型, 其几何构型与网格划分如图3所示。该计算模型由 AISi10Mg 铝合金翅片和正十八烷相变材料两相构成, 各材料的热物理参数见表1^[14-15]。整个计算模型宽为50 mm, 高度为30.9 mm, 宽高比满足黄金分割比例。中心翅片宽度为1 mm、高度为25 mm。模型边界条件和初始状态的设置与试验工况保持一致, 其中底部边界施加 $T_w=333.15$ K 的恒定壁温, 其余外表面均设置为绝热边界; 整个系统的初始温度设置为293.15 K, 对应相变材料为完全固态。采用尺寸为0.5 mm的四边形网格对计算域进行离散, 并在模型外边界及翅片-相变材料交界面处设置了加密的边界层网格。瞬态计算的时间步长设置为0.1 s。通过开展网格无关性研究, 对比分析0.25 mm、

0.5 mm、1 mm 三种网格尺寸对熔化分数曲线的影响, 结果见图4(a)。当网格尺寸从0.5 mm细化至0.25 mm时, 结果曲线几乎无变化, 表明0.5 mm的网格尺寸设置满足计算结果的精度要求。同时, 开展时间步长无关性验算, 对比分析0.05 s、0.1 s、0.5 s 三种时间步长对熔化分数的影响, 结果见图4(b)。采用0.1 s时间步长的结果曲线与0.05 s高度吻合, 且计算效率更高, 故确定0.1 s为后续计算的时间步长。

2.2 计算原理

采用图3所示计算模型分析金属翅片/正十八烷熔化储热过程, 须同时实现热量传输、液相流动和固-液相变三大物理现象。在计算时, 底部热源通过高导热翅片向内部传热时需满足傅里叶热传导定律^[9]:

$$\rho_c C_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = k_c \cdot \nabla^2 T_c \quad (2)$$

式中, ρ_c 为翅片密度; C_c 为翅片比热容; T_c 为翅片温度; t 为时间; k_c 为翅片热传导系数; ∇ 为哈密顿算子。

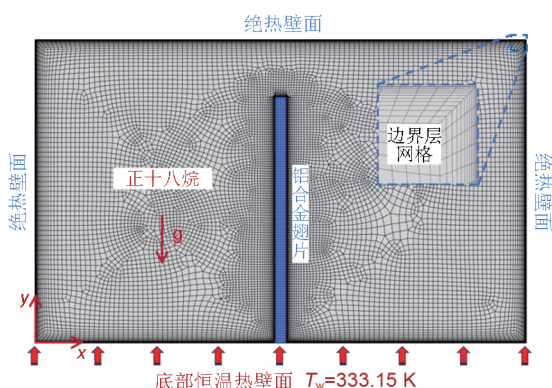


图3 铝合金翅片/正十八烷复合相变材料熔化计算模型
Fig. 3 Computational model of aluminum alloy fin/n-octadecane composite PCM

表 1 热物理参数

Table 1 Thermophysical parameters

| 参数 | 符号 | 正十八烷 | AlSi10Mg |
|-------------------------|------------|---------------------------------------|---------------|
| 密度/(kg/m ³) | ρ_s | 860 | 2722.5-0.206T |
| | ρ_l | -0.77+987.205 | — |
| 导热系数/[W/(m·K)] | k_s | 0.348 | 132.92+0.04T |
| | k_l | -4.17×10 ⁻⁴ T+0.3029 | — |
| 比热容/[J/(kg·K)] | C_s | 1934 | 657.96+0.809T |
| | C_l | 2196 | — |
| 动力黏度/(Pa·s) | μ_l | 0.0004T ² -0.3063T+59.6364 | — |
| | μ_s | — | — |
| 熔点/K | T_m | 301.15 | — |
| 熔化区间/K | ΔT | 1 | — |
| 相变潜热/(kJ/kg) | L_m | 243.5 | — |

假定翅片与正十八烷界面为理想热接触，界面处翅片温度 T_c 与正十八烷温度 T 保持一致：

$$T_c = T \quad (3)$$

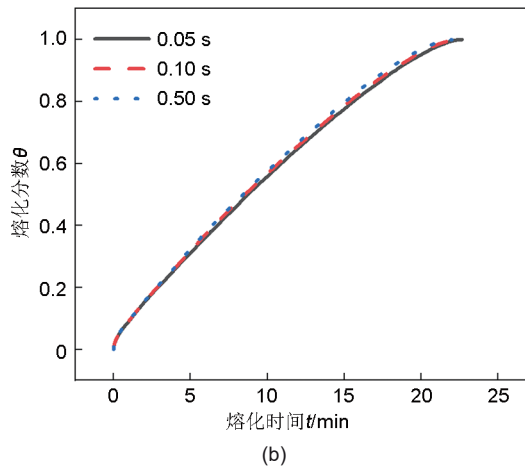
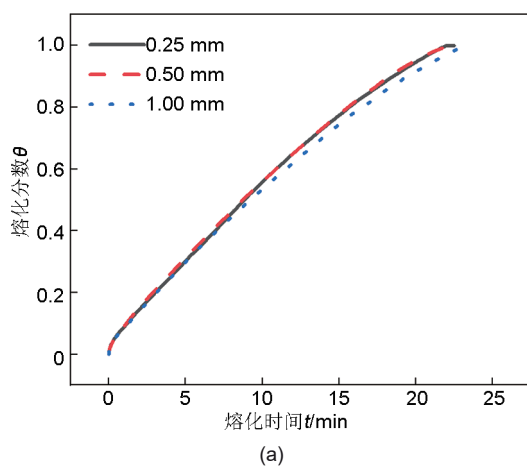


图 4 无关性分析：(a) 网格尺寸；(b) 时间步长
Fig. 4 Independence analysis: (a) Mesh size; (b) time step

当正十八烷温度 T 超过熔点 T_m 时，相变材料将发生固-液相变，开始储存潜热。储热过程中的固相、液相和模糊区 3 种相态，由液体分数 f 控制^[9]。
 $f(T) =$

$$f(T) = \begin{cases} 0, & T < T_m - 0.5\Delta T \\ (T - T_m + 0.5\Delta T)/\Delta T, & T_m - 0.5\Delta T \leq T \leq T_m + 0.5\Delta T \\ 1, & T > T_m + 0.5\Delta T \end{cases} \quad (4)$$

式中， f 为液体分数，当 $f=0$ 时为固相， $f=1$ 时为液相， $0 < f < 1$ 时为模糊区； T_m 为熔点； ΔT 为熔化区间。

熔化后的正十八烷相变材料在温度梯度驱动下将产生浮升力，液相浮升力 F 采用 Boussinesq 假设^[11]计算。

$$F = -\rho[1 - \alpha(T - T_m)]g \quad (5)$$

式中， F 为浮升力； ρ 为密度； α 为热膨胀系数； g 为重力加速度。

浮升力驱动液相产生自然对流运动，流动过程中需同时满足质量守恒[式(6)]、动量方程[式(7)]和能量方程[式(8)]^[14]：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \{-pI + \mu[\nabla u + (\nabla u)^T]\} + F \quad (7)$$

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T + \tau : \nabla u + \alpha T \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \cdot \nabla \rho \right) \quad (8)$$

式中， u 为液相流速； p 为压强； I 为单位矢量； μ 为动力黏度； C 为比热容； k 为热传导系数； T 为黏滞应力张量。

在固-液模糊区，相变材料的热物理参数采用线性模式过渡，如式(9)~(11)。

$$\rho(T) = (1 - f)\rho_s + f\rho_l \quad (9)$$

$$k(T) = (1 - f)k_s + fk_l \quad (10)$$

$$C(T) = (1 - f)C_s + fC_l \quad (11)$$

式中, 下标s表示固相; l表示液相。

3 结果与讨论

3.1 数值模拟与试验测试结果对比

图5为数值模拟得到的熔化边界形态, 通过与

图2对比可知, 试验记录的熔化边界演化过程与数值模拟结果高度吻合。采用式(1), 获得了试验测试与数值模拟的熔化分数-时间关系曲线见图6, 试验测得的固相完全熔化时间约为24 min, 而数值模拟结果为22.7 min, 两者相对误差仅为5.4%。结果一致性验证了本研究所建立熔化储热计算模型的准确性, 表明其可用于后续系统分析金属翅片对正十八烷相变材料熔化储热行为的影响。

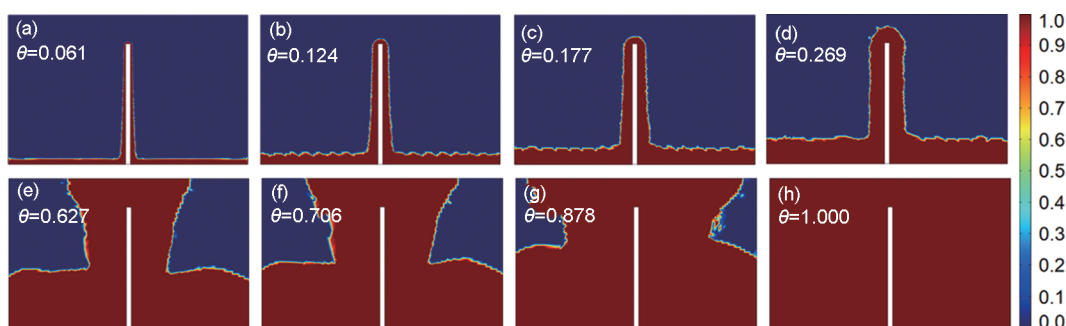


图5 数值模拟的熔化边界形态

Fig. 5 Numerical melting front morphology

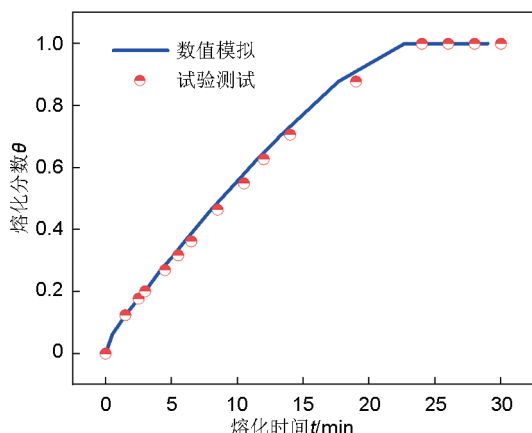


图6 熔化分数结果对比

Fig. 6 Comparison of melting fraction results

3.2 金属翅片对相变材料熔化特性的增强作用

为了探究金属翅片对相变材料熔化过程的影响, 在初始温度 $T_0=293.15$ K、底部恒温热源 $T_w=333.15$ K的条件下, 对纯相变材料、金属翅片增强相变材料两种工况的熔化储热过程进行模拟计算。图7为两种工况下的熔化分数-时间关系曲线, 图8为熔化过程的温度云图与流场矢量图, 图9为沿特定路径的温度分布。

由图7可知, 纯正十八烷相变材料的熔化分数与时间关系近似呈线性分布, 其完全熔化所需时间为2010 s。依据式(12)计算得到平均熔化储热速率

为1.61 J/s。当嵌入金属翅片后, 构成的增强相变材料(EPCM)完全熔化所需时间缩短至1360 s, 平均熔化储热速率提高至2.34 J/s, 较纯相变材料提升了45.3%。

由图8(a)、(c)、(e)、(g)可知, 纯相变材料熔化过程可分为四个典型阶段: 热传导主导阶段、羽流生长阶段、过渡阶段和强对流阶段。各阶段的熔化边界形态分别为水平直线、阵列小波、融合大波和无规则波, 这种阶段性差异主要源于自然对流强度的变化。尽管液相区内的自然对流促进了底部热源向熔化边界的热量传递, 但液相区平均温度约为318 K, 较底部热源存在约15 K的温降, 见图9。因此, 提高热量向熔化边界的传输效率是强化相变材料熔化过程的关键。

由图8(b)、(d)、(f)、(h)可知, 金属翅片凭借其高导热特性, 显著增强了热量自底部热源向相变材料内部的传递。在7 s内, 翅片整体温度即达到相变材料熔点, 迅速引发翅片边界处相变材料的熔化。之后, 被翅片分隔的左右两侧相变材料由单一底部熔化模式转变为底部与侧面同时熔化, 从而加速熔化进程。此外, 金属翅片顶端区域熔化后的液相温度可达325 K, 较纯相变材料液相区温度提高约7 K, 见图9。更高的液相温度增强了自然对流强度, 进而强化了对熔化边界的热冲刷作用, 进一

步提升了熔化速率。

综上所述，金属翅片对相变材料熔化过程的强化机制主要包括以下两方面：①金属翅片增大了传热面积，改变了相变材料的熔化模式，由单一方向传热发展为多向传热；②金属翅片引导热量定向传递，提高了液相区温度，增强了自然对流及其对熔化边界的热冲刷效果。

$$q = \frac{Ab\rho L_m}{t_i} \quad (12)$$

式中， q 为平均熔化储热速率； t_i 为总熔化时间； A 为横截面积； b 为厚度； ρ 为密度； L_m 为相变潜热。

3.3 翅片高度的影响

为了探究金属翅片高度对相变材料熔化过程的影响，将翅片高度 h 由 5 mm 逐步增加至 30 mm，计算得不同翅片高度对应的熔化分数-时间关系曲线见图 10，翅片高度对熔化边界形态的影响见

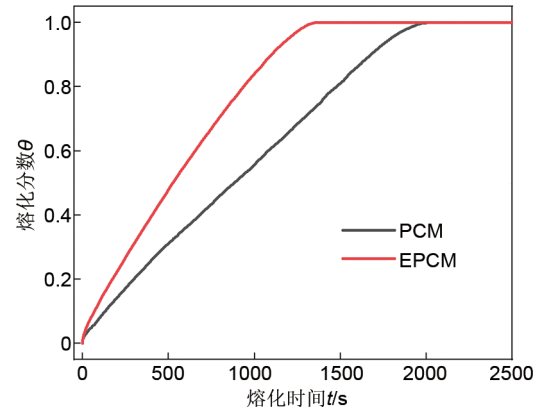


图 7 金属翅片对熔化速率的影响
Fig. 7 Effect of metal fins on the melting rate

图 11。各工况下翅片的横截面积均与 $h=25$ mm 的基准翅片保持一致，其几何关系满足式(13)。

$$a \times h = (1 \times 25) \text{ mm}^2 \quad (13)$$

式中， a 为翅片宽度； h 为翅片高度。

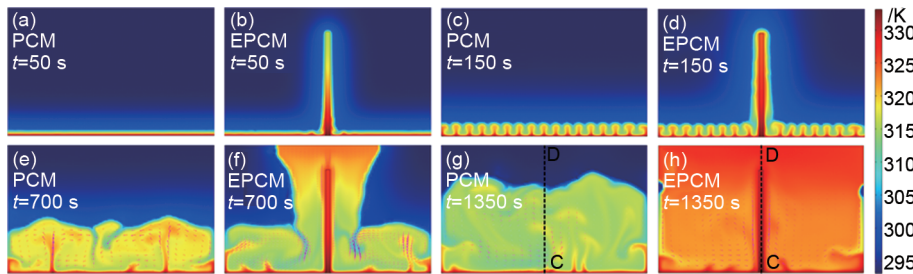


图 8 相变材料熔化过程的温度分布云图与流场矢量图

Fig. 8 Temperature distribution contours and velocity vector fields of the PCM during the melting process

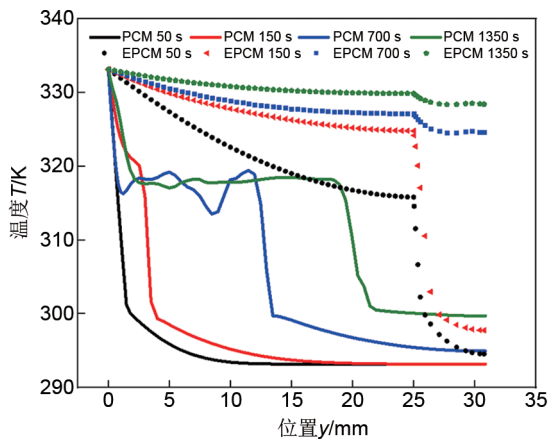


图 9 温度沿路径 CD 分布

Fig. 9 Temperature distribution along path CD

由图 10 可知，增加金属翅片高度可强化热量向相变材料内部的传递，从而缩短完全熔化时间，提高平均储热速率。具体而言，当金属翅片高度分别为 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm 和

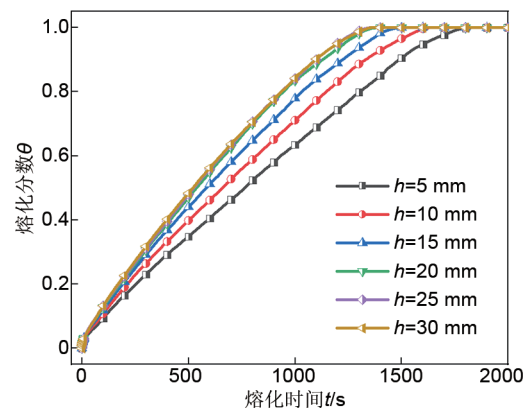
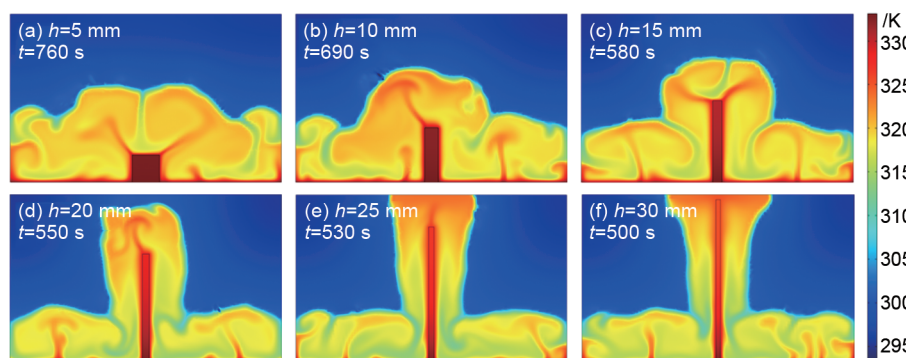


图 10 翅片高度对熔化分数-时间关系的影响

Fig. 10 Effect of fin height on the melting fraction-time relationship

30 mm 时，总熔化时间依次为 1840 s、1640 s、1490 s、1390 s、1360 s 和 1360 s，依据式(12)计算得到的平均熔化储热速率依次为 1.73 J/s、1.94 J/s、2.14 J/s、2.29 J/s、2.34 J/s 和 2.34 J/s。值得注

图 11 翅片高度对熔化边界形态的影响 ($\theta=0.5$)Fig. 11 Effect of fin height on the melting front morphology ($\theta=0.5$)

意的是,当金属翅片高度由 25 mm 增至 30 mm 时,总熔化时间与平均储热速率均未发生明显变化,表明在此范围内继续增加高度对熔化过程的强化效果已趋于饱和。此外,由图 11 可知,在相同熔化分数下,不同翅片高度对应的熔化边界形态存在显著差异。然而,25 mm 与 30 mm 两种工况下的熔化边界形态高度相似,这与图 10 中两者熔化曲线接近的结果相一致。综合上述分析,在翅片横截面积保持不变的条件下,增加翅片高度可有效强化传热,但高度超过 25 mm 后强化效果不再显著。因此,从优化材料用量与提升储热性能两方面考虑,本研究认为 $h=25$ mm 为此结构下的最佳翅片高度。

3.4 翅片梯度的影响

已有研究表明^[16-17],将功能梯度蜂窝结构应用于相变材料强化设计,可有效匹配熔化过程中因固-液界面移动引起的热阻动态变化,从而突破熔化后期的传热瓶颈,达到提升储热效率的目的。基于相似原理,为了探究梯度金属翅片是否具备类似的强化效应,本研究计算了 7 种不同梯度结构的翅片对相变材料熔化储热过程的影响。不同梯度下的熔化分数-时间关系曲线见图 12,对应的熔化边界形态见图 13。本研究将翅片梯度定义为翅片底边宽度 a 与顶边宽度 b 的比值,其变化范围为 1:1~7:1。

由图 12 可知,不同梯度翅片作用下的熔化分数-时间关系曲线高度重合。具体而言,梯度为 1:1 至 7:1 的翅片所对应的总熔化时间介于 1320~1360 s 之间,根据式(12)计算得到的平均熔化储热速率则分布于 2.34~2.41 J/s 的狭窄范围内。与梯度为 1:1 的均匀翅片相比,优化翅片梯度对储热速率的提升幅度仅为 1.5%,改善效果甚微。此外,

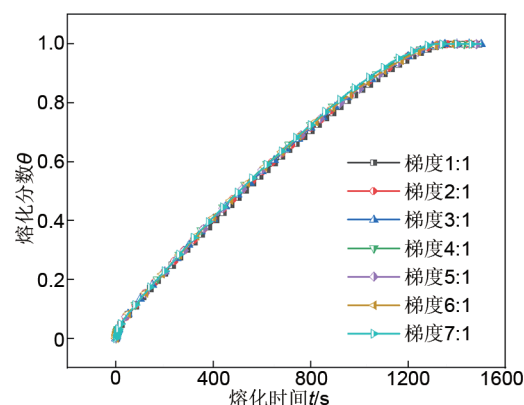


图 12 翅片梯度对液体分数-时间曲线的影响

Fig. 12 Effect of fin gradient on the liquid fraction-time curve

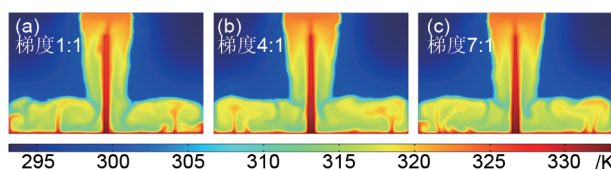


图 13 翅片梯度对熔化边界形态的影响

Fig. 13 Effect of fin gradient on the melting front morphology

通过对比图 13 所示 1:1、4:1 及 7:1 三种典型梯度下的熔化边界形态可以发现,其固-液界面演变过程极为相似,进一步表明翅片梯度的改变对相变材料的熔化模式影响有限。综合上述分析,在本研究的参数范围内,翅片梯度对相变材料熔化储热速率及熔化边界形态的影响均不显著,其强化效果基本可忽略不计。

3.5 分散翅片的影响

上述分析表明,单一翅片对相变材料的传热强化作用集中于其周边有限区域。将单一翅片分散为若干等间距排列的翅片,可有效增大相变材料与翅

片间的传热面积，促进热量从翅片表面向相变材料的传递。同时，分散翅片能够分割液态区域，抑制大尺度涡流的形成，减小其对流传热热阻，使液相区温度分布更为均匀，从而有望进一步提升相变材料的熔化储热速率。本研究采用平均分配原则确定分散翅片的宽度 a ，其几何关系满足式(14)。保持翅片初始高度 25 mm 不变，将初始宽度为 1 mm 的单一翅片分别分散为 2~7 个等间距翅片(n)，对应的翅片宽度 a 由 0.50 mm 降至 0.14 mm。不同翅片数目下的熔化分数-时间关系曲线、熔化储热效率与翅片数目的关系见图 14，对熔化边界形态的影响见图 15。

$$n \times a = 1 \text{ mm} \quad (14)$$

式中， n 为翅片数目； a 为翅片宽度。

由图 14 可知，采用分散翅片结构以增大传热面积，可显著提升相变材料的熔化储热速率。当单一中间翅片被分散为 2~7 个等间距翅片时，总熔化时间从 1360 s 依次缩短至 1100 s、980 s、890 s、820 s、830 s、840 s，相应的平均熔化储热速率则由 2.34 J/s 依次提升至 2.89 J/s、3.25 J/s、3.58 J/s、3.88 J/s、3.83 J/s、3.79 J/s。结果表明，熔化储热速率随翅片数目的增加呈先增加后减小的变化趋势，并在 $n=5$ 时达到最大值，因此可视为本结构下的最优翅片数目。

3.6 优化翅片分散模式

根据图 15 所示结果，尽管等间距分散翅片显著提升了相变材料的整体熔化储热速率，但在容器两端区域仍存在固相熔化迟滞现象。为改善此问题，本研究以 5 根等宽度等间距分散翅片(记为 $5a$ 模式)为基础，将其布局优化为不等宽度 $0.5a+4a+0.5a$ 的非均匀模式。该优化方案在维持金属翅片总体积不变的前提下，旨在进一步增大有效传热面积，从而提升熔化速率。两种分散模式下的熔化分数-时间关系曲线如图 16 所示，其对熔化边界形态的影响见图 17。

由图 16 可知，将分散模式从 $5a$ 优化为 $0.5a+4a+0.5a$ 后，相变材料的完全熔化时间由 820 s 缩短至 760 s，相应的平均熔化储热速率由 3.88 J/s 提升至 4.19 J/s，再次提升了约 8%。这一提升主要发生在熔化后期($0.7 < \theta < 1$)，其原因是优化后的翅片布局促进了液相区内温度分布的均匀，既形成了有序的对流通道的，又有效抑制了无序涡流的产生，从而强化了热量向残余固相区的传递效率。与纯相

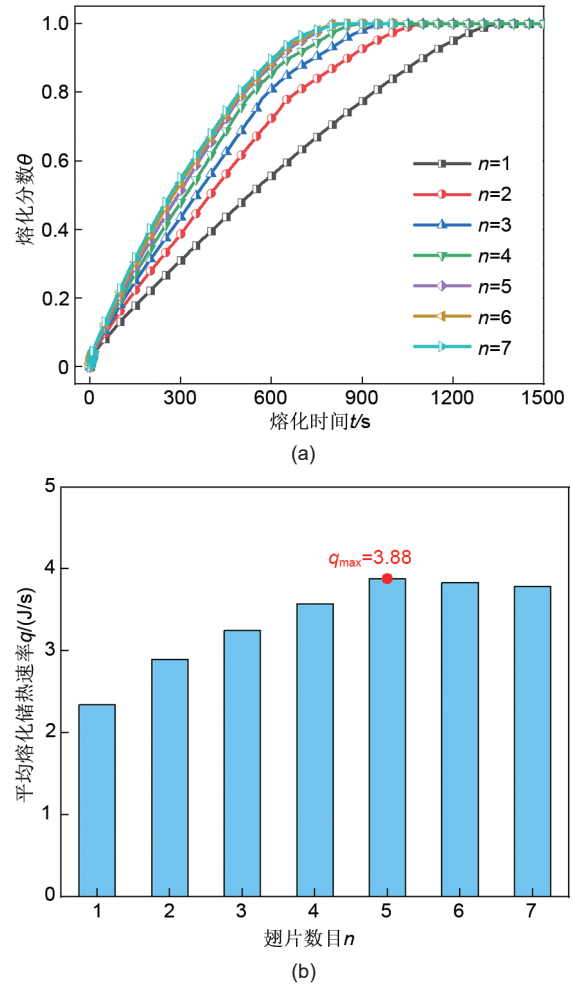


图 14 翅片数目影响：(a) 液体分数随时间变化；(b) 熔化储热速率

Fig. 14 Effect of fin number: (a) Variation of liquid fraction with time; (b) melting heat storage rate

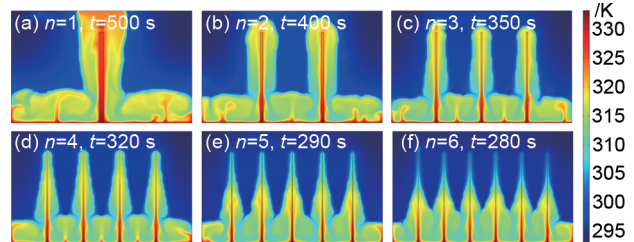


图 15 翅片数目对熔化边界形态的影响

Fig. 15 Effect of fin numbers on the melting front morphology

变材料相比，优化后的分布模式将平均熔化储热速率提升约 260%，可视为本研究所探讨的最佳翅片分布方案。

3.7 金属翅片材料的影响

为研究不同金属翅片材料对相变材料整体熔化

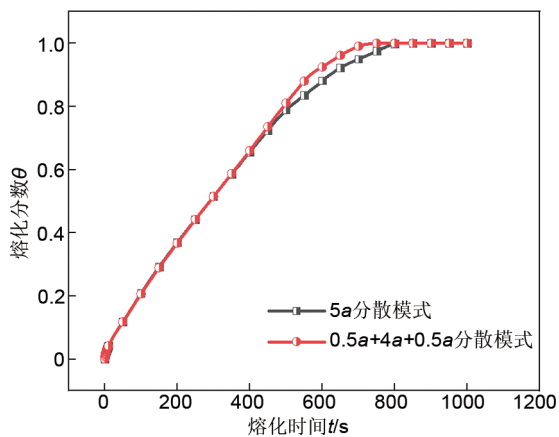


图16 分散模式对液体分数-时间曲线的影响

Fig. 16 Effect of fin distribution pattern on the liquid fraction-time curve

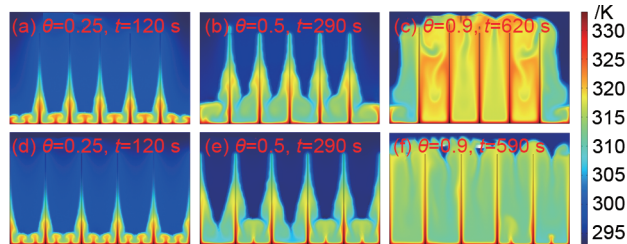


图17 翅片分散模式对熔化边界形态的影响

Fig. 17 Effect of fin distribution pattern on the melting front morphology

储能性能的影响,选择3.6中获取的最优翅片分散模式,对比分析了纯铜、AlSi10Mg铝合金、316L不锈钢、Ti6Al4V钛合金、Inconel718镍合金5种材料金属翅片对相变材料熔化分数-时间关系曲线、平均熔化储热速率等性能的影响,结果如图18所示。五种材料均为常用的SLM金属3D打印材料,对应的导热系数分别为385 W/(m·K)、135.3 W/(m·K)、13.8 W/(m·K)、11.4 W/(m·K)、7.1 W/(m·K)。

由图18可知,不同材料金属翅片作用下,相变材料的熔化分数-时间曲线均呈现近似线性增长的规律。当翅片材料为纯铜时,相变材料完全熔化所需时间最短,仅为540 s;而采用不锈钢、镍合金和钛合金时,完全熔化时间分别增加至1640 s、1740 s和1850 s。根据式(12)计算得到的纯铜、铝合金、不锈钢、镍合金和钛合金作用下的相变材料的平均熔化速率分别为5.89 J/s、4.19 J/s、1.94 J/s、1.83 J/s和1.72 J/s。由此可知,金属翅片的导热系数是影响相变材料熔化速率的关键因素。在所选金属材料中,纯铜凭借更高的导热系数,对熔化速率的提升

最为显著,其熔化速率较铝合金提高了40.57%。相反,钛合金因导热系数最低,对熔化速率的提升作用最为有限,其熔化速率较铝合金降低了58.95%。

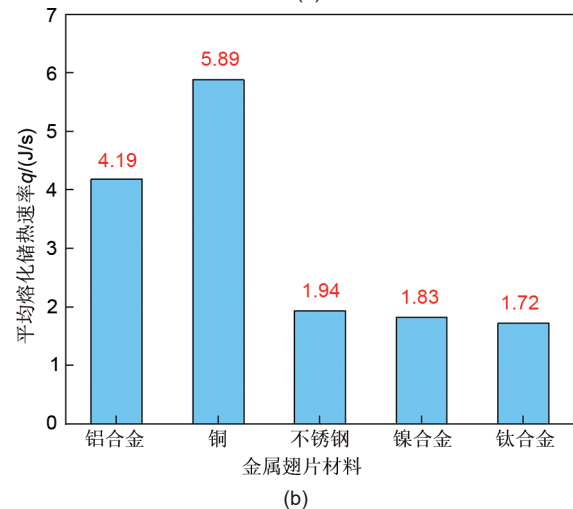
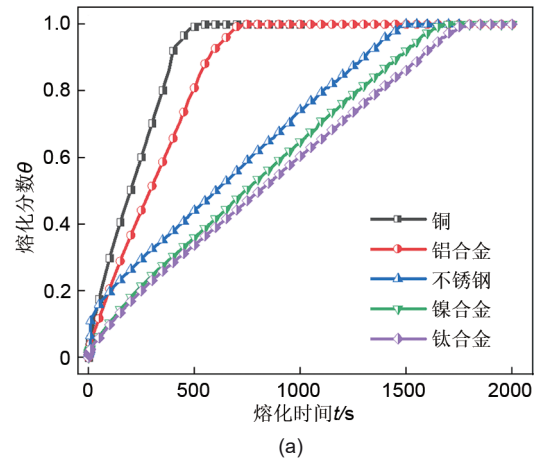


图18 翅片材料影响: (a) 熔化分数随时间变化; (b) 熔化储热速率

Fig. 18 Effect of fin material: (a) Variation of liquid fraction with time; (b) melting heat storage rate

4 结论

本研究通过数值模拟与试验测试相结合的方式,系统研究了金属翅片结构对相变材料熔化储热性能的强化作用,主要得到以下结论。

(1) 金属翅片通过增大传热面积、引导热量定向传递及改变熔化模式,显著强化了相变材料的熔化过程。采用单根高度为25 mm的铝合金翅片,可使正十八烷的平均熔化储热速率提升45.3%。

(2) 在翅片横截面积保持不变的条件下,熔化储热速率随翅片高度的增加呈先增后饱和的趋势。

高度为 25 mm 时效果最优, 继续增加高度对性能无显著提升。

(3) 翅片梯度对熔化过程影响甚微, 其最大储热速率提升幅度仅为 1.5%, 且对熔化边界形态无明显影响。

(4) 采用分散翅片结构可进一步提升性能, 储热速率随翅片数目增加呈先增后减趋势。当翅片数目为 5 时, 储热速率达到最大值。

(5) 将 5a 翅片分散模式进一步优化为 0.5a+4a+0.5a 模式后, 可使熔化储热速率再提升约 8%。与纯相变材料相比, 该优化模式的整体储热速率提升约 260%, 为本工作所提出的最佳翅片分布构型。

(6) 金属翅片的导热系数是影响相变材料熔化速率的关键因素, 对于常用的 SLM 金属 3D 打印材料, 具有较高导热系数的纯铜对熔化速率的提升最为显著, 较铝合金提高了 40.57%。

参考文献

- 朱杰. 新能源低碳背景下电动汽车电热相变储能系统的储热性能分析[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(12): 4406-4408.
ZHU J. Analysis of thermal storage performance of electric vehicle thermal phase change energy storage system under the background of new energy and low carbon[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(12): 4406-4408.
- 刘纹佳, 杜如雪, 王思齐, 等. 电-热转换功能型相变储热材料的研究进展及应用[J]. 化工学报, 2025, 76(7): 3185-3196. DOI:10.11949/0438-1157.20241469.
LIU W J, DU R X, WANG S Q, et al. Research status and application of functional phase change materials for electro-thermal conversion in thermal energy storage[J]. CIESC Journal, 2025, 76(7): 3185-3196. DOI:10.11949/0438-1157.20241469.
- 沈天锋, 孙志高. 正辛酸-十六醇/膨胀石墨复合相变材料制备与性能[J]. 功能材料, 2025, 56(6): 6186-6194. DOI:10.3969/j.issn.1001-9731.2025.06.023.
SHEN T F, SUN Z G. Preparation and properties of caprylic acid-hexadecanol/expanded graphite composite phase change materials[J]. Journal of Functional Materials, 2025, 56(6): 6186-6194. DOI:10.3969/j.issn.1001-9731.2025.06.023.
- 西北航, 胡昊, 张皓寒, 等. 相变储热材料在光热转换领域的研究进展[J]. 过程工程学报, 2025, 25(8): 792-803. DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.224344.
XI B H, HU H, ZHANG H H, et al. Research progress of phase change thermal storage materials in the field of photothermal conversion[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2025, 25(8): 792-803. DOI:10.12034/j.issn.1009-606X.224344.
- 张馨文, 翟鑫钰, 董翠翠, 等. 改性正十八烷相变纳米胶囊制备表征及在太阳能建筑中的应用[J]. 太阳能学报, 2023, 44(4): 290-298. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-1561.
ZHANG X W, ZHAI X Y, DONG B B, et al. Preparation and characterization of modified SiO₂/n-octadecane phase change nanocapsules and their application in solar building[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(4): 290-298. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-1561.
- 阎少多, 朱正洪, 刘敏霞, 等. 相变材料运血箱海上血液前送补给性能评价研究[J]. 军事医学, 2017, 41(9): 707-710. DOI:10.7644/j.issn.1674-9960.2017.09.001.
YAN S D, ZHU Z H, LIU M X, et al. Effect of blood containers containing phase-changed material on quality of stored RBCs on the sea[J]. Military Medical Sciences, 2017, 41(9): 707-710. DOI: 10.7644/j.issn.1674-9960.2017.09.001.
- ONG P J, SHUKO LEE H Y, WANG S X, et al. Recent advances in enhanced thermal property in phase change materials using carbon nanotubes: A review[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2025, 279: 113228. DOI:10.1016/j.solmat.2024.113228.
- KANT K, SHUKLA A, SHARMA A, et al. Heat transfer study of phase change materials with graphene nano particle for thermal energy storage[J]. Solar Energy, 2017, 146: 453-463. DOI: 10.1016/j.solener.2017.03.013.
- ARAMESH M, SHABANI B. Metal foam-phase change material composites for thermal energy storage: A review of performance parameters[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 155: 111919. DOI:10.1016/j.rser.2021.111919.
- LI R F, ZHOU Y, DUAN X L. A novel composite phase change material with paraffin wax in tailings porous ceramics[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 151: 115-123. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.104.
- 柴伟杰, 赵锡佳, 曹世豪. 金属蜂窝增强相变材料熔化储热试验与数值模拟[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(12): 4357-4367.
CHAI W J, ZHAO X J, CAO S H. Experimental and numerical studies on the melting heat storage of metal honeycomb-enhanced phase-change materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(12): 4357-4367.
- TAHMASBI M, SIAVASHI M, KARIMI A R, et al. The effects of fins number, metal foam, and helical coil on the thermal storage enhancement of the phase change material: An experimental study[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 253: 123780. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123780.
- 袁威, 韩瑞元, 杜双庆, 等. 螺旋翅片和环形翅片对相变储能罐传热性能的影响[J]. 动力工程学报, 2025, 45(9): 1463-1473.
YUAN W, HAN R Y, DU S Q, et al. Impact of spiral fins and circular fins on heat transfer performance in phase change energy storage tanks[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(9): 1463-1473.
- CAO S H, ZHAO X J, WANG F Q, et al. Experimental investigation on the thermophysical properties and solidification characteristics of n-octadecane in a spherical capsule[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 64: 105475. DOI:10.1016/j.csite.2024.105475.
- XU Y T, LI Y Z, WANG L J, et al. Molten pool macroscopic thermodynamic analysis during selective laser melting of AlSi₁₀Mg: Simulations and experiments[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 2506-2518. DOI:10.1016/j.jmrt.2024.09.216.
- SHEN Z H, HUA J F, HE Y Q, et al. Experimental study of melting on graded metal foam composite phase change materials under nonuniform heat flux[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 239: 126613. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126613.
- KANT K, BIWOLE P H, SHUKLA A, et al. Heat transfer and energy storage performances of phase change materials encapsulated in honeycomb cells[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 38: 102507. DOI:10.1016/j.est.2021.102507.