储能材料与器件

仿合欢花粉形相变胶囊的释热强化机制研究

曹 斌[1]，王 鑫[1]，姚海沉[2#]，刘向雷[2, 3, 4]
（[1]内蒙古大青山实验室，内蒙古 呼和浩特 010010；[2]南京航空航天大学能源与动力学院，江苏 南京 210016；[3]航空发动机热环境与热结构工业和信息化部重点实验室，江苏 南京 210016；[4]南京航空航天大学综合能源研究院，江苏 南京 210016）

摘 要：球形相变胶囊在释热过程中因内部导热路径长、后期释热功率显著下降，制约了填充床储热系统的功率密度提升。受合欢花粉蜂窝状放射结构启发，提出一种仿花粉形相变胶囊，通过在球形空间内构建均匀分布的径向导热网络以缩短传热距离。采用数值模拟方法，系统研究了柱形、环形、板形及花粉形四种翅片构型对凝固过程的影响，并进一步分析了翅片长度与胶囊半径之比*L/R*对释热性能的作用规律。结果表明，花粉形翅片将内部相变材料划分为多个小尺度传热区域，促进固液界面均匀推进。传热路径定量分析显示，花粉形结构的平均最小传热距离D_{avg}为0.895 mm，较板形、环形及柱形结构分别降低35.3%、44.3%和51.0%。与板形、环形、柱形及无翅片胶囊相比，花粉形胶囊的释热时间分别缩短25.6%、38.0%、44.9%和76.3%。增大*L/R*可使翅片延伸至球心区域，缩短中心残余液芯的最大局部传热距离。当*L/R*由2/3增至5/6时，D_{avg}由0.895 mm降至0.856 mm，总释热时间由1960 s缩短至1770 s，较无翅片胶囊减少78.6%，其中释热后期（液相率0.25~0.01）的改善量占总改善量的90%以上。继续增加*L/R*至5/6以后，D_{avg}降幅趋于饱和，释热时间的边际缩短亦明显减小。单位功率成本评价表明，*L/R*=5/6结构较*L/R*=2/3进一步降低约6.4%，为所有花粉形结构中的最低值。综合考虑释热性能、单位功率成本与制造可行性，*L/R*=5/6为本研究条件下的优选结构。该仿生设计策略为高功率密度填充床相变储/释热系统的性能优化提供了新思路。

关键词：相变；储热；仿生学；凝固传热；翅片
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0638
中图分类号：TK 02　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-4239（XXXX）XX-1-13

Heat Release Enhancement Mechanism of Albizzia Pollen-Inspired Phase Change Capsules

CAO Bin[1], WANG Xin[1], YAO Haichen[2#], LIU Xianglei[2, 3, 4]
([1]Inner Mongolia Daqingshan Laboratory, Hohhot 010010, Inner Mongolia; [2]School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China; [3]Key Laboratory of Thermal Management and Energy Utilization of Aviation Vehicles, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing 210016, Jiangsu, China; [4]Integrated Energy Institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Spherical phase change capsules generally suffer from long internal heat-transfer

收稿日期：2026-07-21；修改稿日期：2026-08-19。
基金项目：内蒙古自治区科技创新发展专项资金资助，大青山实验室科技支撑项目（No.2025KYPT0185）；国家重点研发计划项目（No.2023YFE0105300）；国家自然科学基金基础科学中心项目（No.51888103）；江苏省自然科学基金项目（No.BK20202008， BE2022024，BK20220009，BK20220001，BK20220077， BE2022602）。
第一作者：曹斌（1981—），女，博士，高级工程师，主要研究方向：新能源电力系统仿真与试验，E-mail：caobinbd@163.com通信作者：姚海沉（1997—），男，博士研究生，主要研究方向为热能储存与释放，E-mail：yaohaichen@nuaa.edu.cn。
引用本文：曹斌, 王鑫, 姚海沉, 等. 仿合欢花粉形相变胶囊的释热强化机制研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-13.
Citation：CAO Bin, WANG Xin, YAO Haichen, et al. Heat Release Enhancement Mechanism of Albizzia Pollen-Inspired Phase Change Capsules [J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-13.

paths and a pronounced decline in heat release power during the late stage of solidification, limiting further improvements in the power density of packed-bed thermal energy storage systems. Inspired by the honeycomb-like radial structure of Albizzia pollen, a pollen-inspired phase change capsule featuring a uniformly distributed radial heat-conduction network is proposed to shorten the heat-transfer paths within the spherical PCM domain. Three-dimensional numerical simulations were conducted to systematically investigate the effects of four fin configurations—pin fins, annular fins, plate fins, and pollen-inspired fins—on the solidification process, and the influence of the fin length-to-radius ratio (*L*/*R*) on heat release performance was further analyzed. The results show that the pollen-inspired fins divide the PCM into multiple small-scale heat-transfer regions, thereby promoting more uniform advancement of the solid-liquid interface. Quantitative analysis of the heat-transfer paths indicates that the average minimum heat-transfer distance D_{avg} of the pollen-inspired configuration is 0.895 mm, which is 35.3%, 44.3%, and 51.0% lower than those of the plate-fin, annular-fin, and pin-fin configurations, respectively. Compared with the plate-fin, annular-fin, pin-fin, and finless capsules, the pollen-inspired capsule reduces the discharging time by 25.6%, 38.0%, 44.9%, and 76.3%, respectively. Increasing L/R extends the high-conductivity fins toward the capsule center, thereby shortening the local heat-transfer paths of the residual liquid PCM in the central region. As *L*/*R* increases from 2/3 to 5/6, D_{avg} decreases from 0.895 mm to 0.856 mm, while the total discharging time decreases from 1960 s to 1770 s, corresponding to a 78.6% reduction relative to the finless capsule. More than 90% of the reduction in discharging time achieved by increasing *L*/*R* from 2/3 to 5/6 occurs during the late solidification stage with a liquid fraction of 0.25–0.01, demonstrating that extending the fins primarily enhances heat extraction from the residual liquid PCM near the capsule center. As *L*/*R* approaches 5/6, the reductions in D_{avg} and discharging time exhibit diminishing returns. The unit power cost of the *L*/*R*=5/6 configuration is the lowest among the pollen-inspired configurations and is approximately 6.4% lower than that of the *L*/*R*=2/3 configuration. Considering heat release performance, unit power cost, and manufacturability, *L*/*R*=5/6 is identified as the preferred configuration under the conditions investigated. This biomimetic design strategy provides a promising approach for enhancing the power density of packed-bed phase change thermal energy storage/release systems.

Keywords: Phase change; Thermal energy storage; Biomimetics; Solidification heat transfer; Fins

随着太阳能、风能等清洁可再生能源的大规模开发与利用，能源供给与需求之间在时间和空间上的不匹配问题日益突出。储/释热技术因能够实现热能的跨时间调节与稳定输出，被认为是提升能源利用效率和保障能源系统稳定运行的重要手段[1]。根据储热机理不同，热能储存方式主要包括显热储热、潜热储热以及热化学储热。其中，基于相变材料的潜热储热技术因具有储热密度高、储热过程近似等温以及工作温度可调等优势，在太阳能热利用[2]、建筑节能[3]、工业余热回收[4]、空调制冷[5]及电子器件热管理[6]等领域展现出广阔应用前景。在实际应用中，相变材料通常需要封装以避免熔化泄漏[7]。在多种封装构型中，球形相变胶囊因几何形状规则、堆积受力较均匀且易于形成稳定填充结构而受到广泛关注[8]。当大量球形胶囊堆积于储热容器内即构成填充床储释热系统，这是其最为典型的工程应用形式之一。然而，球形胶囊普遍存在释热速率较低的问题，尤其在释热后期，外侧相变材料

率先凝固并逐渐增厚，内部剩余液态相变材料向冷壁传热时需要穿过不断增厚的固态区域，导致导热热阻显著增加，热量难以及时释放，从而在胶囊中心区域形成明显的热量滞留[9]。已有研究表明，球形相变胶囊的凝固过程通常明显慢于熔化过程，这主要与凝固后期自然对流减弱有关[10]。因此，如何突破胶囊内部的长路径导热瓶颈并强化后期释热，是提升填充床储热系统功率密度的关键。

针对上述问题，在胶囊内部嵌入高导热翅片以构建导热骨架，是最常用且有效的强化手段[11, 12]。围绕针翅、环翅、板翅等传统构型，研究者开展了系统探索。Fan等人[13]分析了环形翅片球形胶囊内的约束相变过程；Govindaraj等人[14]探讨了不同翅片方向对强化传热效果的影响；Jia等人[15]则优化了针翅球形胶囊的几何参数。这些研究表明，传统翅片能够在一定程度上缩短传热路径并提高释热速率，但其导热结构通常集中于局部区域，难以在三维球形空间内形成均匀的导热网络，对中心区域后期热量滞留问题的改善依然有限。因此，亟需探索更契合球形空间特征的翅片构型。

近年来，仿生学为强化相变储热提供了新的设计思路。自然界生物结构经过长期进化，形成了高度优化的物质与能量传递网络[16]。在胶囊外形仿生方面，研究者提出了仿红细胞[17]、仿卵形[18]、仿叶绿体[19]、仿线粒体[20]及表面凹坑化[21]等多种构型。在胶囊内翅片仿生设计方面，近年也出现了一些探索。Wu等人[22]在球形冰蓄冷胶囊内引入仿生分叉翅片，研究了翅片几何构型对水凝固过程的影响，发现分形维数为3的优化仿生翅片可使单位时间和单位重量下的储能容量提高30.01%。Wang等人[23]提出了蒲公英形多级分支仿生翅片用于球形冰蓄冷胶囊，通过优化翅片构型以最大化冷却储能容量，其优化的翅片构型使单位时间储能容量平均提升34.64%。Yu等人[24]受海螺壳结构启发，提出了仿生海螺和仿生线粒体两种封装模型，其中仿生海螺结构的储热效率分别比仿生线粒体和直翅片结构高出43.11%和14.62%，其强化机理在于内部螺旋翅片大幅增加了换热面积，增加翅片可使储热效率提高402.89%。上述研究表明仿生设计在强化球形胶囊相变传热方面具有显著潜力。然而，现有球形胶囊仿生翅片研究多聚焦于冰蓄冷凝固或有机相变材料的熔化储热，而对热导率更低、凝固释热速率更慢的有机相变材料在仿生胶囊中的释热过程研究鲜有报道。

花粉作为植物繁殖过程中的重要载体，其内部通常具有高度发达的蜂窝状多孔结构，用于实现营养物质和生理活性物质的快速交换与传输。其中，合欢花粉呈现出典型的多孔蜂窝状几何特征，其放射状连接结构能够在有限空间内构建高效传输通道[25]。受此启发，本文提出了一种仿合欢花粉结构的相变胶囊，通过构建蜂窝状径向翅片网络，在球形胶囊内部形成均匀分布的高导热路径，从而降低内部热阻并强化后期释热性能。本文基于焓－孔隙率模型，对仿花粉形相变胶囊的释热过程进行了三维数值模拟，并系统研究了不同翅片结构（柱形、环形、板形及花粉形）对凝固界面演化、液相率变化、释热速率以及释热时间的影响。同时，进一步优化了花粉形翅片长度与胶囊半径之比，分析了翅片长度、翅片体积分数与制造可行性之间的关系，以获得兼具高释热性能与工程可实现性的优化结构。本研究为高功率密度相变填充床储/释热系统的仿生优化设计提供了新的思路。

1　数值模型

1.1　物理模型

作为支撑植物生命活动的基础物质，花粉内部储存有脂质、淀粉、葡萄糖、果糖、维生素及酶类等多种营养物质与生理活性物质，可为种子初始阶段的萌发过程提供动力。在众多花粉类型中，合欢花粉具有独特的蜂窝状放射结构。该结构由大量六边形与五边形微孔构成，呈放射状排列，具有极高的比表面积和优异的物质输运能力。这种结构能够在花粉内外实现高效的物质交换，既保证了内部遗传物质的安全包裹，又为萌发过程中的快速能量与物质传输提供了通道[25]。受此启发，本研究将合欢花粉的蜂窝状放射结构引入相变储热单元的设计中，以期通过仿生翅片构型突破传统单元内部传热缓慢的瓶颈。如图1所示，本研究提出的仿花粉相变储热单元为球形结构，内部集成仿花粉状放射翅片。该翅片由30个六边形孔洞与12个五边形孔洞构成，整体呈放射状向外辐射分布。在几何参数方面，参考合欢花粉的微观结构特征，本设计中翅片的壁宽W与壁厚δ并非恒定值，而是随局部半径R线性变化，即保持W/R=0.35、δ/R=0.04的比例关

系。因此，靠近球心处翅片较薄较窄，向外辐射方向逐渐增厚增宽。

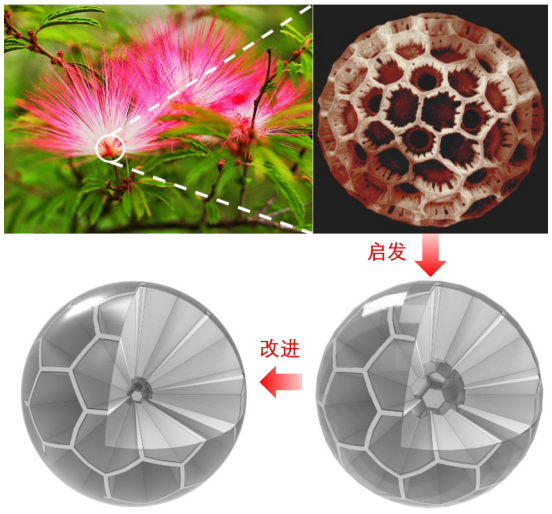


图1 仿合欢花粉形相变胶囊的仿生设计示意图（花粉扫描电镜图引自文献[26, 27]）

Fig. 1 Biomimetic design of the Albizzia pollen-inspired phase change capsule (pollen SEM image reproduced from Refs.[26, 27])

本文提出的花粉形翅片拟采用激光熔融3D打印技术制备，材料选用316L不锈钢。该工艺最小成形特征尺寸可达100 μm。花粉形翅片内部为蜂窝状通孔结构，各孔道沿径向从球心向外壁完全贯通，不存在封闭内腔或大角度悬垂区域，因此打印过程中无需额外添加内部支撑材料，打印完成后残余粉末可通过孔道自由排出，无需脱模工序。外壳拟采用热收缩PVC薄膜封装，厚度0.2 mm，将打印成型的翅片置入薄膜后加热至130℃（高于PVC收缩温度）即可使薄膜紧密贴合翅片表面，形成完整封装。为系统探究不同翅片构型对释热性能的影响，本研究选取柱状翅片（沿径向分布的圆柱形针肋）、环状翅片（围绕单元内壁的环形肋片）、板状翅片（正交布置的平板）以及本文提出的花粉形翅片四种类型进行对比。所有单元外径均为30 mm，翅片体积占内部空腔体积的比值均为12.7%，翅片材料均为316L不锈钢，外壳材料均为热收缩PVC薄膜。图2展示了各类相变单元翅片与外壳的物理结构及实物照片，表1汇总了RT28石蜡、316L不锈钢及PVC薄膜的热物理性质，包括密度、导热系数、比热容、相变温度、动力黏度、热膨胀系数及潜热等参数，为后续数值模拟提供基础数据。

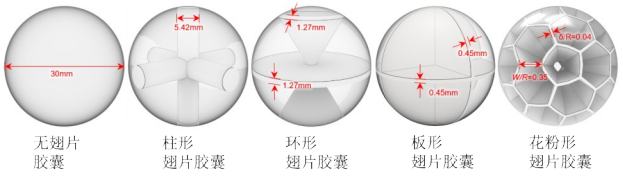


图2 不同翅片构型相变胶囊的几何模型

Fig. 2 Geometric models of phase change capsules with different fin configurations

表1 材料热物理性质

Table 1 Thermophysical properties of materials

热物理性质	单位	石蜡 (RT28)	不锈钢 (316L)[28]	聚氯乙烯薄膜
密度	$kg·m^{-3}$	830	8030	1400
热导率	$W·m^{-1}·K^{-1}$	0.2	16.27	0.16
比热容	$J·kg^{-1}·K^{-1}$	2000	502.48	900
融化温度	°C	27~29	—	—
动力黏度	$kg·m^{-1}·s^{-1}$	0.00256	—	—
热膨胀系数	K^{-1}	0.0005	—	—
潜热	$kJ·kg^{-1}$	245	—	—

1.2 控制方程

本文基于焓-孔隙率模型研究三维坐标下的瞬态相变过程，并进行以下假设和简化：

1) RT28石蜡、316L不锈钢和聚氯乙烯薄膜的热物理性能是恒定不变的。

2) 液态相变材料的流动是层流的，采用Boussinesq近似模拟自然对流的浮力效应。

3) 忽略胶囊内的辐射传热。

4) 忽略相变过程中相变材料的体积变化。

基于上述假设建立数学模型，控制方程如下：

(I) 连续性方程

$$\rho_{PCM}\nabla\vec{u} = 0 \tag{1}$$

式中，ρ_{PCM}为相变材料的密度（$kg·m^{-3}$），$\vec{u}$为速度矢量（$m·s^{-1}$）。

(II) 动量方程

$$\rho_{PCM}\frac{\partial\vec{u}}{\partial t} + \rho_{PCM}(\vec{u}\cdot\nabla)\vec{u} = -\nabla p + \mu_{PCM}\nabla^2\vec{u} + \rho_{PCM}\vec{g}\beta(T_{PCM} - T_m) + \vec{S}_g \tag{2}$$

$$\vec{S}_g = \frac{A_{mush}(1-f_l)^2}{\xi + f_l^3}\vec{u}_p \tag{3}$$

其中，p为压力，μ_f为动力黏度，$\vec{g}$为重力加速度，β为热膨胀系数，T_{PCM}为相变材料温度，T_m为相变温度，$\vec{S}_g$为动量源项。A_{mush}是糊状区常数，取10^5[29, 30]。$\xi = 10^{-3}$为避免分母为零的小常数[31, 32]。

(□)　能量方程

相变材料区域的能量方程为：

$$\rho_{PCM}c_{p,PCM}\frac{\partial T_{PCM}}{\partial t}+\rho_{PCM}c_{p,fin}\vec{u}\cdot\nabla T_{PCM}=\nabla\cdot\left(\lambda_{PCM}\nabla T_{PCM}\right)-\rho_{PCM}La\frac{\partial f_l}{\partial t} \tag{4}$$

翅片区域的能量方程为:

$$\rho_{fin}c_{p,fin}\frac{\partial T_{fin}}{\partial t}=\nabla\cdot\left(\lambda_{fin}\nabla T_{fin}\right) \tag{5}$$

其中，λ 为导热系数，L_a 为相变潜热，$\rho_f\vec{g}\beta(T_f-T_m)$用于描述液态相变材料中的浮力驱动流动，液相率$f_l$由温度决定：

$$f_l=\begin{cases}0 & T\leqslant T_{solidus}\\ \dfrac{(T-T_{solidus})}{T_{liquidus}-T_{solidus}} & T_{solidus}<T<T_{liquidus}\\ 1 & T\geqslant T_{liquidus}\end{cases} \tag{6}$$

其中，$T_{solidus}$为固相线温度，$T_{liquidus}$为液相线温度。

1.3　初始条件与边界条件

最初，假定相变胶囊是完全融化状态，可以表示为：

$$t=0\rightarrow u=0,T=T_{init}=313.15\text{K} \tag{7}$$

胶囊外壁表面为恒温，可表示为：

$$r=r_0\rightarrow u=0,T=T_{wall-out}=298.15\text{K} \tag{8}$$

1.4　无关性验证和模型验证

采用有限体积法求解了上述质量、动量和能量的控制方程。在模拟开始之前考察了网格尺寸和时间步长的影响。结果表明，当仿花粉形相变胶囊的网格数量为1,208,233，时间步长为0.1 s时，进一步加密网格或者缩短计算步长，液相率变化几乎不变。此时，网格数量以及时间步长满足计算要求。此外，为了验证仿真结果的合理性，利用该计算方法进行了两类球形相变胶囊的模拟验证。首先，与Ettouney等人[33]的无翅片纯相变储热胶囊实验结果进行了对比。实验中，石蜡被填充在直径为20 mm的铜球中，球壳厚1 mm。相变材料初始温度为296.15 K，释热环境温度为297.15 K。如图3(a)所示，模拟结果与实验数据吻合良好，最大误差仅为5.4%。其次，为验证模型对复杂内翅片结构的适用性，本文针对Jia等人[15]的实验进行了复现与对比，该实验采用内半径20 mm、壁厚2 mm的6061铝合金球壳，填充复合相变材料并内置2根针肋。监控测点位置（-8.7 mm，-8.7 mm，-8.7 mm）的温度变化与实验测试数据进行对比。图3(b)所示，本模型预测的温度变化曲线与Jia等人的实验数据在整个释热周期内高度一致，二者最大相对误差仅为1.28%。上述双重验证共同支撑了本文数值方法的可靠性，可用于后续复杂仿生结构的进一步分析。

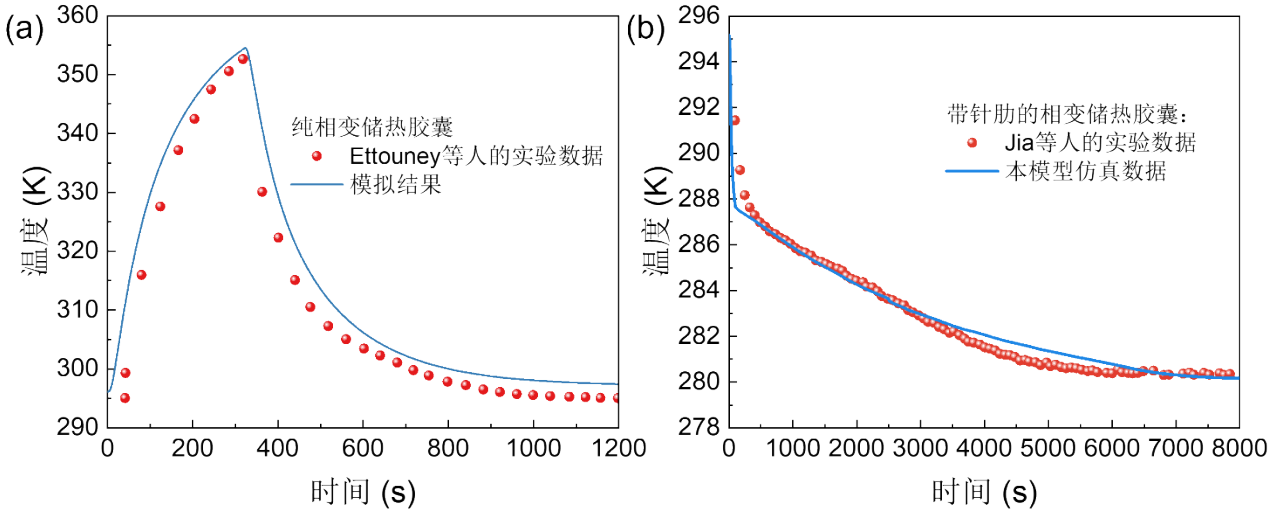


图3　数值模型验证：(a) 与Ettouney等[33]无翅片球形胶囊实验结果对比；(b) 与Jia等[15]带针肋球形胶囊实验结果对比实验数据对比

Fig. 3　Validation of the numerical model: (a) comparison with the experimental results of the finless spherical capsule reported by Ettouney et al.[33] ; (b) comparison with the experimental results of the spherical capsule with pin fins reported by Jia et al.[15]

2 结果与讨论

2.1 不同翅片类型的相界面演化过程

图4展示了无翅片、柱形翅片、环形翅片、板形翅片及花粉形翅片胶囊在释热过程中的瞬态固液界面演化。总体来看，各胶囊均由低温外壁向内部逐渐凝固，但不同翅片构型对固液界面的推进方向、推进速度及残余液态相变材料的空间分布产生了显著影响。在释热初期（120 s），各结构外壁附近均首先形成较薄的固态层，不同胶囊之间的差异相对有限。这是由于此时PCM整体处于液态，与恒温冷壁之间温差较大，外壁附近具有较强的温差驱动力，释热过程主要受近壁区域快速导热控制。随着凝固过程继续进行，外层固态PCM逐渐增厚，固液界面不断向球心移动，不同翅片结构所建立的内部导热路径开始发挥主导作用。

对于无翅片胶囊，热量主要依靠低导热PCM自身传递至外壁，因此随着固液界面不断内移，内部液态PCM与冷壁之间的导热距离持续增加。至1080 s以后，中心区域仍保留大范围液态PCM，并逐渐形成明显的残余液态核心。同时，液态PCM中的浮力运动使凝固过程具有一定空间非均匀性，表明单纯依靠外壁换热难以有效释放球心区域的热量。

柱形翅片和环形翅片能够在局部区域构建高导热通道，因此其固液界面推进速度明显快于无翅片结构。但柱形翅片之间仍存在较大的PCM连续区域；环形翅片虽然增加了径向不同位置处的换热面积，但其强化作用主要集中在环形翅片附近，仍难以完全消除翅片之间以及球心附近的长距离导热区域。因此，在凝固中后期，两种结构内部仍可观察到较明显的残余液态区域。

板形翅片通过贯穿球形空间的正交平板显著扩大了高导热骨架的覆盖范围，其固液界面整体推进速度进一步提高。然而，板形翅片主要沿有限的几个平面方向延伸，PCM仍被划分为尺寸相对较大的空间区域，远离板面的局部位置依然存在较长的导热路径。

相比之下，花粉形翅片形成了均匀分布的蜂窝状径向导热网络，将整个球形PCM区域进一步划分为大量小尺度传热单元，使PCM热量能够沿多个方向快速传递至高导热骨架并最终传递至外壁。随着释热过程推进，花粉形胶囊的固液界面始终表现出更快且更均匀的向内推进特征。至1560 s时，其内部绝大部分PCM已经完成凝固；2040 s时基本不存在明显残余液态区域，而其他结构仍保留不同程度的液态PCM。由此表明，花粉形结构的核心优势并非单纯增加局部换热面积，而是通过在三维球形空间中构建高覆盖度、短路径的径向导热网络，有效削弱了传统结构中球心及翅片间隙处的长路径导热瓶颈。

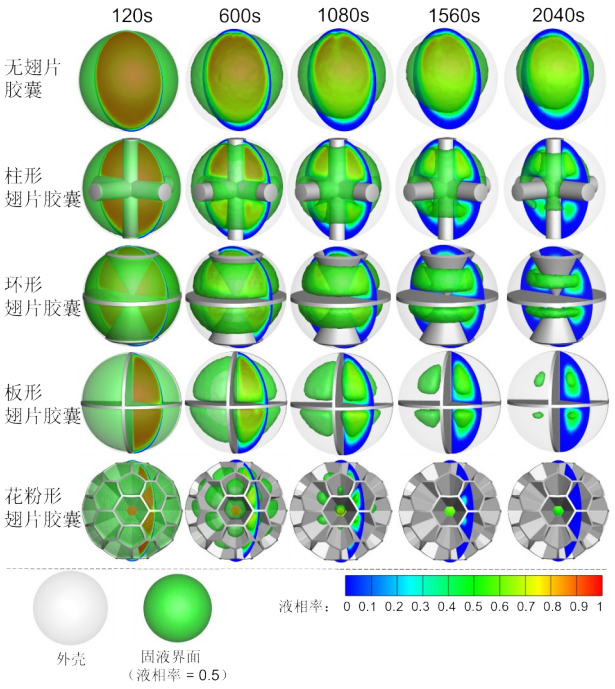


图4 不同翅片构型相变胶囊释热过程中固液界面的瞬态演化

Fig. 4 Transient evolution of the solid-liquid interface in phase change capsules with different fin configurations during discharging

2.2 不同翅片类型对释热过程的影响

为量化上述界面演化差异，图5从壁面热流密度、PCM平均温度、液相率和内部流速四个维度比较了各结构的释热特性。图5(a)给出了t=600 s时的壁面热流密度和PCM体积平均温度。花粉形胶囊的壁面热流密度绝对值达54.31 W/m²，约为板形、环形、柱形及无翅片结构的1.02、1.44、1.32和1.63倍；其PCM平均温度仅为300.99 K，为所有结构中最低。高热流密度表明单位时间内向外壁输运的热量更多，低温则意味着同等时间内内部热量释放更充分，二者共同证实了花粉形导热网

络的高效性。

图5(b)的液相率曲线显示，各结构液相率下降速率排序为：花粉形＞板形＞环形＞柱形＞无翅片。无翅片胶囊后期下降极为缓慢，反映凝固层增厚导致热阻急剧上升；引入翅片后下降明显加快，花粉形最早完成凝固，说明其高导热网络在整个释热过程中持续缩短传热路径，与图4所示的相界面演化结果一致。图5(c)的平均温度变化与液相率规律一致：初始快速显热降温，进入相变区间后因潜热释放而减速，凝固完成后再度缓慢降温。花粉形胶囊最早通过相变温区，无翅片则在相变温区停留最久，表明不同结构的主要性能差异集中在潜热释放阶段，尤其是凝固后期。值得关注的是，图5(d)显示自然对流强度与释热性能并非正相关。无翅片和柱形胶囊的平均流速峰值约为1.47 mm/s，板形和环形分别为0.92和0.86 mm/s，而花粉形仅约0.31 mm/s，为最低。这是因为花粉形蜂窝翅片将液态PCM分割为众多小区域，抑制了大尺度浮力环流。然而，其凝固速度却最快，说明强化机制并非依赖对流，而是通过重构导热路径、缩短固相传热距离实现。这一特性在凝固后期自然对流自然衰减时尤为重要。

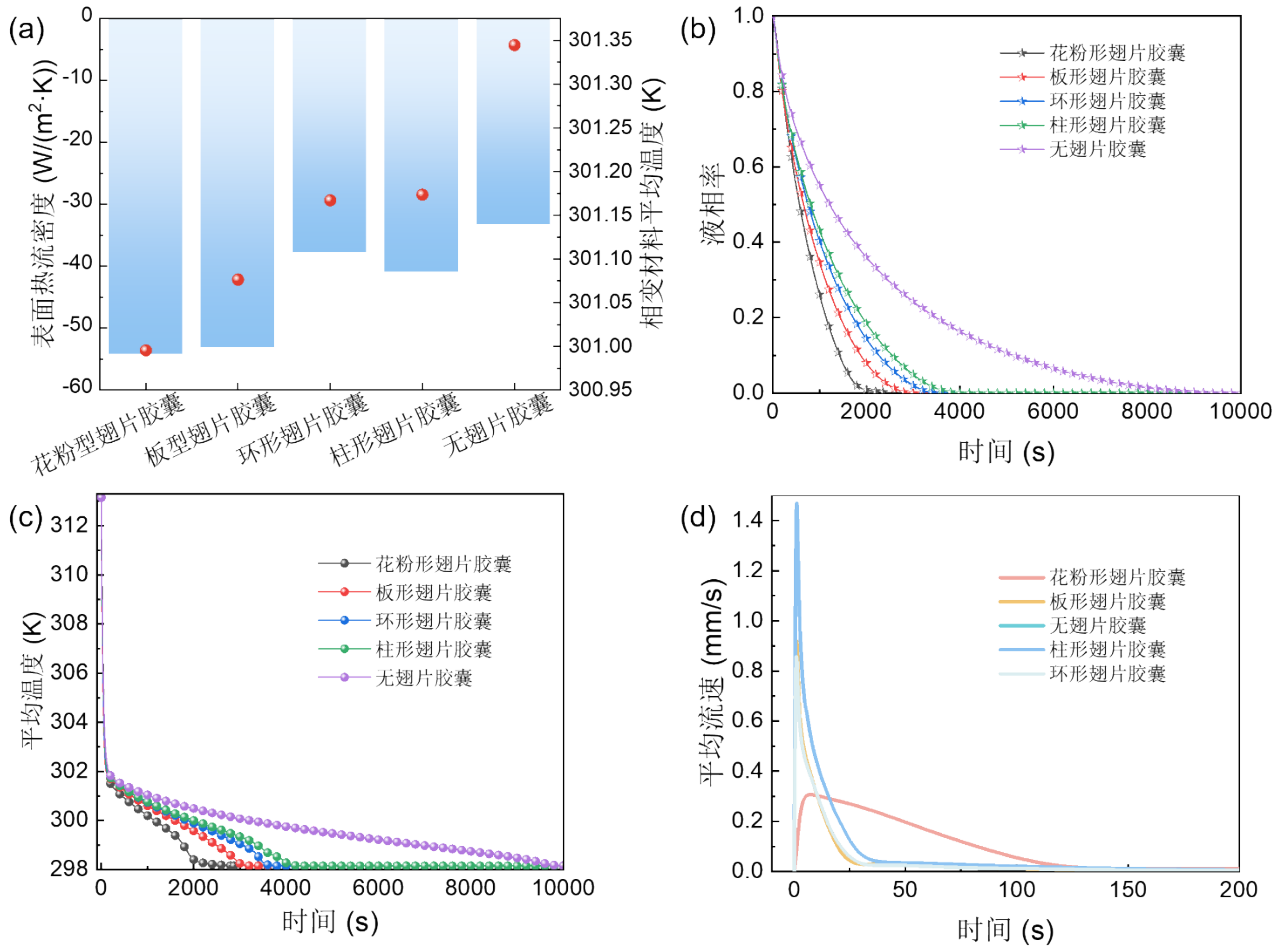


图5　不同翅片构型相变胶囊的热响应特性：(a) *t*=600 s时壁面热流密度与PCM平均温度；(b) 液相率；(c) PCM平均温度；(d) PCM平均流速

Fig. 5　Thermal response characteristics of phase change capsules with different fin configurations: (a) wall heat flux and average PCM temperature at t=600 s; (b) liquid fraction; (c) average PCM temperature; (d) average PCM velocity

为从几何构型本质上揭示上述传热差异的根源，本文引入平均最小传热距离（D_{avg}）作为定量表征参数。针对离散化的数值计算域，首先对第i个相变材料网格单元，以其单元中心为特征点，分别计算该点至最近翅片表面和胶囊外壁面的空间欧氏距离，并取二者中的极小值作为该单元的有效传

热路径长度d_i，即：

$$d_i = \min(d_{i,\mathrm{fin}} - d_{i,\mathrm{wall}}) \tag{9}$$

然而，模拟中为精准捕捉翅片壁面处的温度梯度而对近壁区进行了局部网格加密，若直接对各单元d_i进行算术平均，将导致加密区域（体积小、数量多）的权重过大，从而低估大体积区域（如球心）的实际传热距离。为消除这一数值偏差，本文采用各网格单元的实际体积V_i作为权重因子，定义全局平均最小传热距离为：

$$D_{\mathrm{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{PCM}}} V_i d_i}{\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{PCM}}} V_i} \tag{10}$$

其中N_{PCM}为相变材料区域的网格单元总数。该体积加权平均距离从全局视角刻画了整个PCM区域向有效换热面（翅片或外壁）输送热量的平均路径长度。D_{avg}越小，表明导热骨架的空间覆盖越趋于均匀致密，宏观导热热阻越低。依据上式对各构型进行计算，结果如表2所示。无翅片、柱形、环形、板形及花粉形胶囊的D_{avg}分别为3.750、1.825、1.608、1.383和0.895 mm。相较无翅片结构，花粉形翅片将该距离缩短了76.1%；即便相较于传热性能较好的板形翅片，花粉形仍显著降低了35.3%。这一几何指标的优越性在于花粉形蜂窝状网络对三维球形空间的全方位划分，将大尺度的连续PCM区域分解为众多紧邻翅片的小尺度子区域，从而大幅减少了传统翅片中存在的翅片之间的低导热区域。结合图5和图6可见，D_{avg}的排序与壁面热流密度、液相率下降速率乃至总释热时间呈现严格的负相关单调对应关系，这直接证明花粉形结构对传热路径的几何重构是强化释热的主导机制，而非依赖自然对流的强弱。

在此基础上，图6(a)进一步将整个凝固过程按照液相率区间划分为1～0.75、0.75～0.5、0.5～0.25和0.25～0.01四个阶段。无翅片胶囊四个阶段所需时间分别约为378、838、1710和5352 s，总释热时间达到约8278 s。其中液相率由0.25降低至0.01的最后阶段单独耗时5352 s，占总释热时间约64.7%，说明传统球形胶囊的主要性能瓶颈集中在凝固后期。此时液态PCM主要收缩至球心附近，热量必须经过较厚的已凝固PCM传递至外壁，同时自然对流逐渐消失，从而大幅减缓释热速率。

表2 不同翅片构型相变胶囊的平均最小传热距离

Table 2 Average minimum heat transfer distance of phase change capsules with different fin configurations

结构类型	平均最小传热距离/mm	相较无翅片结构降低幅度/%
无翅片	3.750	—
柱形翅片	1.825	51.3
环形翅片	1.608	57.1
板形翅片	1.383	63.1
花粉形翅片	0.895	76.1

加入翅片后，各阶段耗时均明显缩短，而且越接近凝固后期，强化效果越突出。柱形、环形和板形胶囊的总释热时间分别约为3558、3159和2641 s，而花粉形胶囊四阶段耗时进一步降低至258、315、451和936 s，总释热时间仅为1960 s。与板形、环形、柱形和无翅片胶囊相比，花粉形结构的总释热时间分别缩短约25.6%、38.0%、44.9%和76.3%。特别是在液相率0.25～0.01阶段，花粉形结构仅需936 s，远低于无翅片结构的5352 s，说明蜂窝状径向翅片对后期高热阻区域具有尤其显著的强化作用。

图6(b)给出的瞬时释热速率进一步验证了这一规律。所有结构在释热初期均具有较高释热速率，这是由于初始PCM温度较高、与外壁之间温差较大。随着凝固层逐渐增厚，释热速率整体下降。无翅片胶囊表现出明显的长时间低功率阶段，其本质是球心附近残余液态PCM持续受到长距离导热热阻限制。相比之下，花粉形胶囊在主要相变阶段保持较高的释热能力，并最早下降至接近零。这里释热速率较早归零并不意味着其后期传热能力下降，恰恰说明其潜热已经更早释放完毕。综合图4—图6及表2可知，花粉形翅片通过缩短平均传热路径、削弱局部长距离导热区域并保持高密度径向热传导通路，实现了对凝固全过程，尤其是后期释热过程的有效强化。与Chen等人[34]采用拓扑优化方法得到的球形相变胶囊内翅片设计结果（较直翅片模型缩短凝固时间24.34%）相比，本工作花粉形结构较板形翅片缩短释热时间25.6%，且结构有序、制造工艺成熟，更具工程优势。

2.2 改进花粉形相变胶囊的翅片长度

在确定花粉形拓扑优越性的基础上，本节进一步考察翅片长度与胶囊半径之比L/R对释热性能的影响（图7，L/R=2/3、3/4、4/5、5/6）。随着L/R

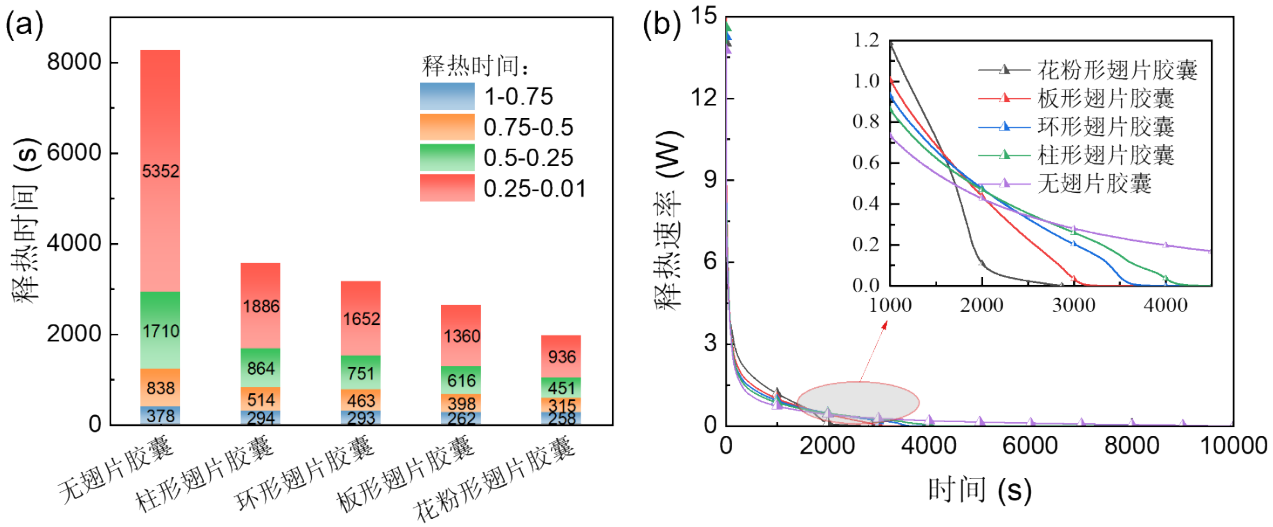


图6　不同翅片构型相变胶囊的释热性能：(a) 不同液相率阶段的释热时间；(b) 瞬时释热速率

Fig. 6　Discharging performance of phase change capsules with different fin configurations: (a) discharging time at different liquid-fraction stages; (b) instantaneous heat release rate

增大，翅片末端向球心延伸，高导热网络对中心区域的覆盖逐步增强。考虑到花粉形翅片径向向内渐缩，*L*/*R*=5/6时球心最小壁厚约100 μm，已接近常规金属增材制造的成形极限，故将其作为上限。

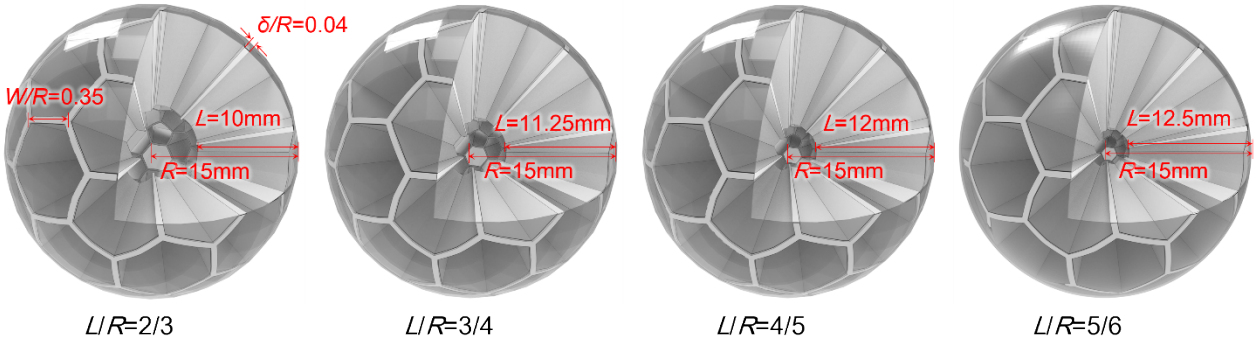


图7　不同翅片长度与半径比（*L*/*R*）的花粉形相变胶囊几何模型

Fig. 7　Geometric models of pollen-inspired phase change capsules with different fin length-to-radius ratios (*L*/*R*)

图8展示了不同*L*/*R*下的固液界面演化。120 s时各结构之间差异较小，说明在释热初期，外壁附近较大的温差驱动力仍占主导地位，翅片向球心延伸程度对整体凝固过程的影响尚未充分体现。随着固液界面逐渐向中心推进，不同结构之间的差异开始扩大。较短翅片无法直接覆盖球心附近区域，因而在中后期形成较明显的中心液态核心；随着*L*/*R*增大，高导热翅片末端逐渐接近该区域，使中心热量可以通过更短的低导热PCM路径进入翅片网络，固液界面因而推进更快。到1560～2040 s阶段，翅片长度的影响最为明显。*L*/*R*=2/3结构在中心区域仍保留残余液态PCM，而*L*/*R*=5/6结构已基本完成凝固。这说明延长翅片的主要作用并不是显著改变释热初期，而是针对凝固后期最难释放的球心区域建立更直接的导热路径，从而削弱最后阶段的热量滞留。

表3进一步从平均最小传热距离角度定量说明了这一变化。随着*L*/*R*从2/3依次提高至3/4、4/5和5/6，D_{avg}由0.895 mm依次降低至0.867、0.859和0.856 mm。相对于*L*/*R*=2/3，后三种结构分别降低3.13%、4.02%和4.36%。其中，*L*/*R*由2/3增加到3/4时，D_{avg}降低约3.13%；继续增加至4/5时

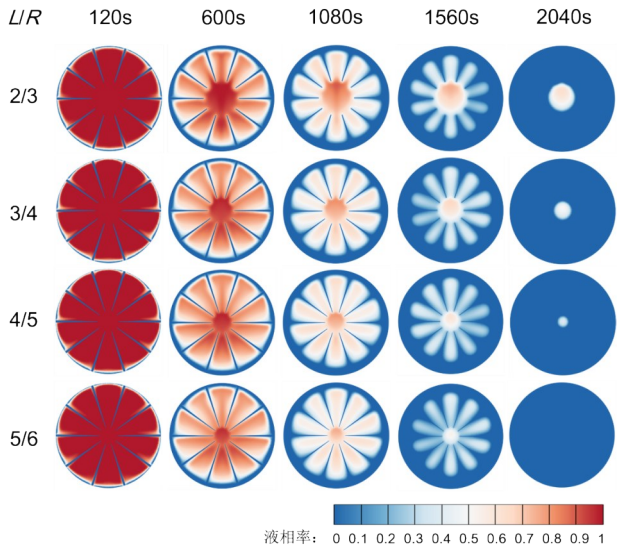


图8 不同翅片长度与半径比*L*/*R*下花粉形相变胶囊固液界面的瞬态演化

Fig. 8 Transient evolution of the solid-liquid interface in pollen-inspired phase change capsules with different fin length-to-radius ratios *L*/*R*

仅进一步降低约0.92%；由4/5增加至5/6后进一步降低幅度仅约0.35%。这表明随着高导热翅片逐步延伸至球心区域，整个PCM空间内的大尺度长路径区域已经被逐步消除，因此继续延长翅片对全域平均传热距离的改善呈明显的边际递减趋势。

表3 不同翅片长度下花粉形相变胶囊的平均最小传热距离

Table 3 Average minimum heat transfer distance of pollen-inspired phase change capsules with different fin lengths

翅片长度与半径之比	平均最小传热距离/mm	相较前一结构降低幅度/%	相较*L*/*R*=2/3降低幅度/%
2/3	0.895	—	—
3/4	0.867	3.13	3.13
4/5	0.859	0.92	4.02
5/6	0.856	0.35	4.36

图9(a)对不同*L*/*R*下各液相率阶段的释热时间进行了进一步分解。*L*/*R*=2/3、3/4、4/5和5/6结构的总释热时间分别约为1960、1834、1813和1770 s。值得注意的是，随着翅片长度增加，前几个释热阶段的时间变化并不显著。例如，液相率1～0.75阶段的时间分别为258、276、276和256 s，0.75～0.5阶段则分别为315、314、314和310 s，说明延长翅片对释热前期的影响有限。相比之下，液相率0.25～0.01阶段的时间由936 s显著降低至796、776和761 s。从*L*/*R*=2/3增至5/6所减少的190 s总释热时间中，有175 s来自最后一个阶段，占总改善量的90%以上。由此进一步证明，翅片向球心延伸所获得的强化收益主要集中在后期残余液态PCM区域，而不是均匀作用于整个凝固过程。

值得注意的是，随着*L*/*R*从2/3增加至5/6，翅片体积分数仅由约12.7%增加至13.1%，仅增加0.4个百分点。也就是说，通过将少量新增高导热材料优先布置于球心高热阻区域，即可获得9.7%的总释热时间缩短，说明这种翅片延伸方式具有较高的材料利用效率。但当*L*/*R*从4/5进一步增加至5/6时，无论D_{avg}还是释热时间的下降幅度均已明显减小，说明中心区域的主要长距离导热路径已经基本得到消除，继续延长翅片的传热收益开始趋于饱和。

值得注意的是，随着*L*/*R*从2/3增加至5/6，翅片体积分数仅由约12.7%增加至13.1%，即增加了0.4%，而平均最小传热距离D_{avg}由0.895 mm降至0.856 mm，总降幅约4.4%，且降幅随翅片延长逐渐收窄。D_{avg}作为体积加权全局平均值，受球心小体积区域的局部变化影响有限，因此其总体降幅不大。然而，释热后期的持续时间主要受最大局部传热距离控制，而非由全局平均值主导。当翅片末端向球心延伸时，该最大距离被显著缩短，使得总释热时间从1960 s降至1770 s，缩短幅度为9.7%。这一对比表明，将少量新增高导热材料优先布置于球心高热阻区域可获得较高的材料利用效率。当*L*/*R*从4/5进一步增至5/6时，D_{avg}降幅已趋饱和，释热时间的边际缩短也明显减小，说明中心区域的主要长距离导热路径已经被大幅缩短，继续延长翅片的传热收益有限。

图9(b)进一步从单位功率成本评价不同结构的工程经济性。传统柱形、环形和板形翅片虽然能够提高释热功率，但增加的金属材料及复杂制造过程使其单位功率成本较高[35]。无翅片胶囊无需内部翅片制造，总制造成本最低，但由于其释热功率仅为0.374 W，单位功率成本仍达到2.335 USD/W，表明低制造成本并不等同于较优的功率经济性。相比之下，花粉形结构通过显著缩短释热时间、提高单位时间释热能力，使单位功率成本进一步降低；其中*L*/*R*=5/6结构的单位功率成本最低，并较*L*/*R*=2/

3进一步降低约6.4%。

因此，从传热性能、储热空间占用及制造经济性三个方面综合考虑，继续增加花粉形翅片长度具有先显著改善、后逐渐饱和的特征。*L*/*R*=5/6能够将高导热网络充分延伸至球心高热阻区域，获得最短的释热时间和最低的平均最小传热距离，同时翅片体积分数仍仅约13.1%；另一方面，其最小结构尺寸已接近3D打印成形极限，继续延伸翅片将进一步增加制造难度并压缩PCM有效体积，而传热收益已十分有限。因此，在本文研究条件下，*L*/*R*=5/6可视为兼顾释热性能、储热容量和制造可行性的优选结构。

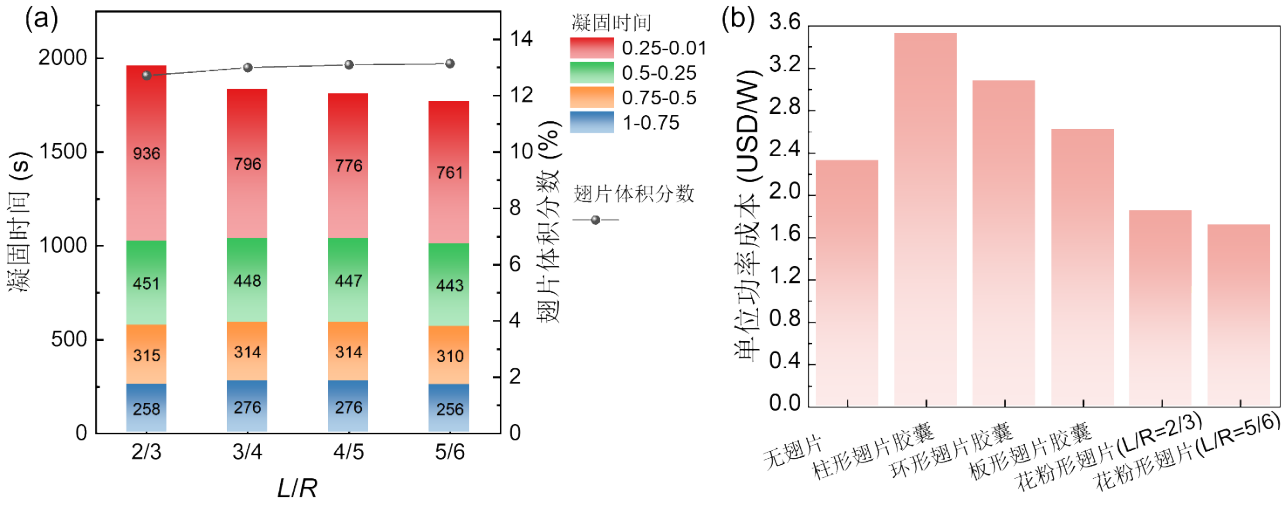


图9　不同翅片长度下花粉形相变胶囊的综合性能：(a) 各液相率阶段释热时间及翅片体积分数；(b) 不同翅片构型及花粉形翅片长度下的单位功率成本

Fig. 9　Comprehensive performance of pollen-inspired phase change capsules with different fin lengths: (a) discharging time at different liquid-fraction stages and fin volume fraction; (b) unit power cost for different fin configurations and pollen-inspired fin lengths

3　结　论

本文受合欢花粉蜂窝状放射结构启发，提出了一种仿花粉形相变胶囊，并研究了翅片构型及翅片长度对胶囊释热性能的影响。主要结论如下：

(1) 仿花粉形翅片能够构建蜂窝状径向导热网络，将内部相变材料划分为多个小尺度传热区域，提高内部热量向胶囊外壁传递的导热通路密度，缩短等效传热距离，并促进固液界面均匀推进。传热路径定量分析表明，花粉形结构的平均最小传热距离D_{avg}仅为0.895 mm，较板形、环形及柱形结构分别降低35.3%、44.3%和51.0%。与板形、环形、柱形及无翅片胶囊相比，花粉形结构的释热时间分别缩短25.6%、38.0%、44.9%和76.3%，且在释热过程中保持更高释热速率。

(2) 增加翅片长度可使导热骨架进一步延伸至球心区域，缩短中心区域残余液态相变材料至外壁的最大局部传热距离，从而强化后期释热过程。当*L*/*R*由2/3增加至5/6时，D_{avg}由0.895 mm降至0.856 mm，释热时间由1960 s降至1770 s，较无翅片胶囊缩短78.6%。释热后期（液相率0.25～0.01）的时间缩短占总体改善量的90%以上，表明延长翅片的强化收益主要集中在中心残余液芯区域。当*L*/*R*由4/5进一步增加至5/6时，D_{avg}降幅已趋于饱和，释热时间的边际缩短也明显减小，说明中心区域的主要长距离导热路径已基本被缩短，继续延长翅片的传热收益有限。

(3) 单位功率成本评价表明，花粉形结构通过显著提高单位时间释热能力，其单位功率成本低于传统翅片结构；其中*L*/*R*=5/6结构为所有花粉形结构中的最低值，较*L*/*R*=2/3进一步降低约6.4%。受花粉形放射状渐缩结构限制，*L*/*R*=5/6时球心处最小翅片厚度为100 μm，已达到常规金属3D打印工艺成形精度极限。综合释热性能、单位功率成本与制造可行性，*L*/*R*=5/6为本研究条件下的优选结构。

本研究仅考察了翅片长度的影响及单一壁温工

况，后续需进一步开展翅片壁厚、蜂窝单元数量等多参数协同优化及变过热度条件下的释热性能研究。本工作揭示了仿花粉翅片结构在相变胶囊释热过程中的传热强化机制，为高功率密度填充床相变储/释热系统的翅片构型设计与性能优化提供了理论与数据支撑。

符 号 说 明

A_{mush}—— 糊状区常数
c_p—— 比热容
f_l—— 液相分数
g—— 重力加速度
H—— 焓
La—— 相变潜热
L—— 翅片长度
p—— 压力
R—— 胶囊半径
$\vec{S}_g$—— 动量方程源项
T—— 温度
T_{init}—— 初始温度
$T_{liquidus}$—— 液相线温度
$T_{solidus}$—— 固相线温度
$T_{wall\text{-}out}$—— 外壁面温度
t—— 时间
$\vec{u}$—— 速度矢量
W—— 壁面宽度
β—— 热膨胀系数
δ—— 翅片厚度
ρ—— 密度
λ—— 导热系数
ρ—— 密度

参 考 文 献

[1] LEWIS N S. Research opportunities to advance solar energy utilization [J]. Science, 2016, 351(6271): aad1920.

[2] WOODS J, MAHVI A, GOYAL A, et al. Rate capability and Ragone plots for phase change thermal energy storage [J]. Nat Energy, 2021, 6(3): 295-302.

[3] DING W, BAUER T. Progress in Research and Development of Molten Chloride Salt Technology for Next Generation Concentrated Solar Power Plants [J]. Engineering, 2021, 7(3): 334-347.

[4] AHMAD A, ANAGNOSTOPOULOS A, NAVARRO M E, et al. A comprehensive material and experimental investigation of a packed bed latent heat storage system based on waste foundry sand [J]. Energy, 2024, 294: 130920.

[5] WANG J, YIN Y, WANG Y, et al. Thermal performance analysis of multi-stage cold storage packed bed with modified phase change material based on Na2SO4·10H2O [J]. Appl Therm Eng, 2023, 219: 119666.

[6] HU X, GONG X, ZHU F, et al. Thermal analysis and optimization of metal foam PCM-based heat sink for thermal management of electronic devices [J]. Renew Energy, 2023, 212: 227-237.

[7] YAN P, DING Z, WU W. Cost strategy-integrated geometry selection of phase change material macro-capsule for latent thermal energy storage [J]. Appl Energy, 2025, 402: 126883.

[8] YU C, LIU F, LIU X, et al. High-power-density miniaturized packed-bed thermal energy storage unit via phase change material capsules [J]. Appl Energy, 2024, 375: 124193.

[9] KENISARIN M M, MAHKAMOV K, COSTA S C, et al. Melting and solidification of PCMs inside a spherical capsule: A critical review [J]. J Energy Storage, 2020, 27: 101082.

[10] ELMOZUGHI A F, SOLOMON L, OZTEKIN A, et al. Encapsulated phase change material for high temperature thermal energy storage – Heat transfer analysis [J]. Int J Heat Mass Transf, 2014, 78: 1135-1144.

[11] HUANG X, DU Z, LIU Z, et al. Research progress of fin design in latent heat energy storage enhancement technology [J]. Appl Therm Eng, 2025, 278: 127157.

[12] CHEN C, DU X, YANG L, et al. Multi-objective optimization of cascaded packed bed thermal energy storage unit based on response surface and factor analysis methods [J]. Appl Energy, 2025, 386: 125598.

[13] FAN L-W, ZHU Z-Q, XIAO S-L, et al. An experimental and numerical investigation of constrained melting heat transfer of a phase change material in a circumferentially finned spherical capsule for thermal energy storage [J]. Appl Therm Eng, 2016, 100: 1063-1075.

[14] GOVINDARAJ K P K, DENKENBERGER D C, RAMALINGAM V. Effect of fin orientations in a spherically encapsulated phase change materials for effective heat transfer enhancement [J]. Chemical Engineering Transactions, 2017, 62: 277-282.

[15] JIA X, ZHAI X, CHENG X. Thermal performance analysis and optimization of a spherical PCM capsule with pin-fins for cold storage [J]. Appl Therm Eng, 2019, 148: 929-938.

[16] LI W, GAO Z, LIU S, et al. Study on the performance improvement of thermal storage tank by encapsulating PCM in the shape of red blood cells [J]. Appl Energy, 2025, 388: 125706.

[17] CHENG X, ZHAI X. Thermal performance analysis of a novel PCM capsule in red blood cell shape [J]. Appl Therm Eng, 2017, 120: 130-137.

[18] DONG Y, WANG F, ZHANG Y, et al. Experimental and numerical study on flow characteristic and thermal performance of macro-capsules phase change material with biomimetic oval structure [J]. Energy, 2022, 238: 121830.

[19] YAO H, LIU X, LI J, et al. Chloroplast-granum inspired phase change capsules accelerate energy storage of packed-bed thermal energy storage system [J]. Energy, 2023, 284: 128563.

[20] TIAN Y, LIU X, ZHENG H, et al. Artificial mitochondrion for fast latent heat storage: Experimental study and lattice Boltzmann simulation [J]. Energy, 2022, 245: 123296.

[21] CHEN X, LI C, YANG Z, et al. Golf-ball-inspired phase change material capsule: Experimental and numerical simulation analysis of flow characteristics and thermal performance [J]. Energy, 2024, 293: 130595.

[22] WU L, YU J, YANG J, et al. Performance enhancement of ice storage capsules by biomimetic fins [J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 158: 144-156.

[23] WANG Y, ZHANG C, YANG W, et al. Thermal Performance Enhancement of Ice Storage Capsule by Dandelion-Shaped Fins [J]. Heat Transfer Engineering, 2024, 47(1): 74-91.

[24] YU J, LIU X, RAO Z. Biomimetic phase change capsules with conch shell structures for improving thermal energy storage efficiency [J]. J Energy Storage, 2024, 90: 111725.

[25] BANKS H, RUDALL P J. Pollen structure and function in caesalpinioid legumes [J]. American Journal of Botany, 2016, 103 (3): 423-436.

[26] KESSELER R, HARLEY M. Pollen: the hidden sexuality of flowers [M]. Firefly Books, 2006.

[27] KESSELER R, HARLEY M. 植物王国的奇迹: 花儿的私生活: the hidden sexuality of flowers [M]. 1 ed. 北京: 人民邮电出版社, 2015.

[28] PENG D, LU Y, ZHANG C, et al. Numerical study of heat transfer characteristic on the melting process of quaternary mixed nitrate [J]. Appl Therm Eng, 2019, 158: 113766.

[29] YANG X, BAI Q, GUO Z, et al. Comparison of direct numerical simulation with volume-averaged method on composite phase change materials for thermal energy storage [J]. Appl Energy, 2018, 229: 700-714.

[30] PU L, ZHANG S, XU L, et al. Numerical study on the performance of shell-and-tube thermal energy storage using multiple PCMs and gradient copper foam [J]. Renew Energy, 2021, 174: 573-589.

[31] SHMUELI H, ZISKIND G, LETAN R. Melting in a vertical cylindrical tube: Numerical investigation and comparison with experiments [J]. Int J Heat Mass Transf, 2010, 53(19-20): 4082-4091.

[32] ARıCı M, BILGIN F, KRAJČíK M, et al. Energy saving and CO2 reduction potential of external building walls containing two layers of phase change material [J]. Energy, 2022, 252: 124010.

[33] ETTOUNEY H, EL-DESSOUKY H, AL-ALI A. Heat Transfer During Phase Change of Paraffin Wax Stored in Spherical Shells [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 127(3): 357-365.

[34] CHEN F, SHENG N, ZHU C. Topology optimization design of inner fins in spherical phase change capsules [J]. J Energy Storage, 2023, 73: 108834.

[35] CHAANAOUI M, BYIRINGIRO J, HAMMOUTI B. Cost modeling of innovative metal 3D printed solar absorber tubes for high-efficiency parabolic trough collector [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2026, 142(7-8): 3835-3849.