



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2309043

引用格式:黄春朴,张久意,邢志博,等.不同封装形状的相变材料胶囊熔化及凝固特性[J].科学技术与工程,2025,25(3):1047-1053.

Huang Chunpu, Zhang Jiuyi, Xing Zhibo, et al. Melting and solidification characteristics of phase change material capsules with different encapsulation shapes[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(3): 1047-1053.

能源与动力工程

不同封装形状的相变材料胶囊熔化及凝固特性

黄春朴,张久意,邢志博,刘英光*

(华北电力大学动力工程系,保定 071003)

摘要 宏观封装的相变材料(phase change material,PCM)胶囊是构成填充床储热罐的核心部件,为强化填充床储热罐的储热速率,优化单个 PCM 胶囊的蓄放热速率是必要的。在保证单个 PCM 胶囊体积一致的情况下,建立了 4 种不同封装形状的 PCM 胶囊。将胶囊置于阻塞率为 0.5 的流场中,充分考虑实际应用过程中的重力方向及换热流体流动方向,对不同封装形状下 PCM 的熔化及凝固过程进行了分析。结果表明:胶囊内液态 PCM 的自然对流可加速 PCM 的熔化与凝固过程,提高蓄/放热速率;相比于球形封装胶囊,圆柱形封装胶囊单位体积下的换热面积提高了 14.47%,PCM 的熔化时间缩短了 42.50%。因此,圆柱形封装胶囊具有最佳的热性能,在未来的研究中可将圆柱形胶囊应用于填充床储热罐中,从而优化其储热性能。

关键词 封装形状;相变胶囊;熔化;凝固;蓄/放热速率

中图分类号 TK124; 文献标志码 A

Melting and Solidification Characteristics of Phase Change Material Capsules with Different Encapsulation Shapes

HUANG Chun-pu, ZHANG Jiu-yi, XING Zhi-bo, LIU Ying-guang*

(Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

[Abstract] Macro-encapsulated phase change material (PCM) capsules are the core components that form the heat storage tank of the packed bed. In order to enhance the heat storage rate of the packed bed tank, it is necessary to optimize the heat storage and discharge rate of individual PCM capsules. Four different encapsulated shapes of PCM capsules were established while ensuring the uniform volume of individual PCM capsules. The capsules were placed in a flow field with an obstruction rate of 0.5, and the melting and solidification processes of PCM under different encapsulation shapes were analyzed with full consideration of gravity direction and heat transfer fluid flow direction in practical applications. The results show that the natural convection of liquid PCM inside the capsule can accelerate the melting and solidification process of PCM and increase the rate of charging and discharging; compared with the spherical encapsulation capsule, the heat transfer area per unit volume of cylindrical encapsulation capsule is increased by 14.47% and the melting time of PCM is shortened by 42.50%. Therefore, the cylindrical encapsulated capsule has the best thermal performance, and the cylindrical capsule can be applied to the packed-bed storage tank in future research to optimize its thermal storage performance.

[Keywords] encapsulation shape; phase change capsule; melting; solidification; charging/ discharging rate

潜热储热技术在发电领域内具有重要意义^[1-3],其主要优点在于技术成熟、储热密度高、储热过程温度稳定;缺点是相变材料(phase change material,PCM)导热系数较低、体积变化易引起泄露等问题^[4-5]。将 PCM 进行宏观封装,制成毫米级别以上的 PCM 胶囊,能够有效解决 PCM 的泄露问题,同时能够增大 PCM 与换热流体(heat transfer fluid, HTF)间的接触面积,强化 PCM 的储热性能。

目前,最常用的宏观封装形式分为球形、矩形板式及环形封装^[6]。Wei 等^[7]早在 2005 年便对球形、圆柱形、板式和管式封装的 PCM 胶囊进行了研究,结果发现在封装直径相同的条件下,球形胶囊表现出了最佳的散热性能。但是他们的研究中却忽略了 PCM 的质量变化,这会导致不同形状胶囊的储热量发生变化。之后,Cheng 等^[8]便制造了 5 种体积相同的宏观封装胶囊,将其置于恒温水浴中进行实验研究,结果

收稿日期:2023-11-17 修订日期:2024-06-24

基金项目:国家自然科学基金(52076080);河北省自然科学基金(E2020502011);中央高校基本科研业务费(2020MS105)

第一作者:黄春朴(1993—),男,汉族,河北保定人,硕士,实验师。研究方向:相变储热。E-mail:51452347@ncepu.edu.cn。

*通信作者:刘英光(1983—),男,汉族,河北保定人,博士,副教授。研究方向:微纳米尺度传热、相变储热。E-mail:liuyingguang@ncepu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

发现红细胞形状封装的 PCM 胶囊具有最佳的热性能。除此之外,还有大量的学者聚焦于单个胶囊形状和热性能优化的研究中^[9-16],提出了许多新颖的封装结构;但是,过于复杂的封装结构将会使得加工难度增大,很难应用于实际应用。因此,优化结构简单,传热性能优良的封装形状仍是进一步的研究重点。

在单个 PCM 胶囊的实验与数值研究中,通常会在胶囊顶部预留一部分空间,以容纳 PCM 在熔化过程中所发生的体积膨胀^[17-20]。但是对于由许多 PCM 胶囊构成的填充床储热罐而言,若考虑每个 PCM 胶囊内的空穴分布,则会使计算过程变得极其复杂。一种较为实用的方法是忽略 PCM 胶囊的内部空穴,认为 PCM 是完全填充的,这样可很大程度地减小相变过程中的计算量。例如,Tan^[21]对比了等温条件下,球形 PCM 胶囊完全填充时的约束熔化过程和与无约束熔化过程,分析了两种熔化过程的特点。另外,根据 Kenisarín 等^[22]的研究综述,发现相较于无约束熔化,目前对于约束熔化过程还没有令人满意的描述。因此,约束熔化问题仍具有很大的研究价值,研究人员对此进行大量的实验与数值研究^[23-28],以描述约束熔化过程中复杂的物理过程。

综合以上文献,发现中国在相变材料封装形状优化及其热性能研究方面已取得显著进展,但与世界先进水平相比仍有差距。中国研究在实验手段和仿真技术上具备优势,能够迅速转化为实际应用。然而,在基础理论和创新能力上仍需提升,特别是在高精度仿真模型构建和复杂工况下热物理性质的研究方面。相比之下,国际上多学科交叉合作较为普遍,研究成果更具广泛性和前沿性。

目前已有的关于胶囊封装形状的研究中,部分文献忽视了直径一致时单个胶囊中所能容纳的 PCM 质量会发生变化;另一部分文献则仅聚焦于等温加热条件下 PCM 胶囊相变过程的研究。少有研究考虑将体积相同的胶囊置于实际流场中进行实验或模拟,以考虑外部 HTF 流动方向的影响。因此,为解决以上问题,建立 4 种不同封装形状的 PCM 胶囊,将其置于流场中。在保证 PCM 质量一致的情况下,还原真实的 HTF 流动方向,对不同封装形状下胶囊内部 PCM 的约束熔化及凝固过程进行研究。得到最佳胶囊封装形状,可为优化填充床储热罐的换热性能提供参考。

1 模型及方程

1.1 几何模型

拟对比 4 种不同的胶囊封装形状,分别为圆柱+球体、圆柱体、球体及圆锥体胶囊。为保证不

同封装形状下的 PCM 胶囊的储热容量一致,只需保持胶囊的体积一致即可。根据刘英光^[29]所设计的以链条形式进行有序固定的填充床储热罐,设置相同数量级尺寸的封装形状,并以圆柱+球体为基础型胶囊,计算出其他封装形状的胶囊尺寸数据,具体如表 1 所示。模拟中采用的 PCM 物性参数^[30]如表 2 所示。

在进行数值模拟时,为简化所研究问题而进行如下假设。

表 1 胶囊形状及尺寸参数

Table 1 Capsule shape and size parameters


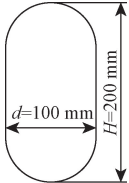

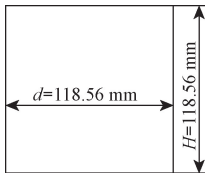
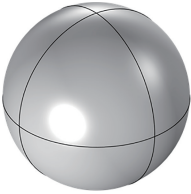
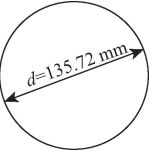

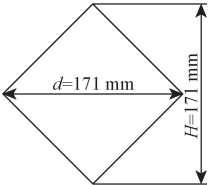
案例	3D 形状	尺寸数据
案例 1 圆柱体 + 球体		
案例 2 圆柱体		
案例 3 球体		
案例 4 圆锥体		

表 2 相变材料物性参数

Table 2 Phase change material physical parameters

参数	数值
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	848 (固)
	767 (液)
导热系数/[$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]	0.4 (固)
	0.15 (液)
比热容/[$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]	1 650 (固)
	1 863 (液)
相变潜热/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	200 000
相变温度/ $^{\circ}\text{C}$	50 ~ 52
热膨胀系数/ K^{-1}	7.7×10^{-4}
运动黏度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	5.6×10^{-3}

(1) 固相及液态 PCM 是均匀和各向同性的。

(2) 胶囊内的 PCM 处于完全填充状态,相变过程中所产生的体积膨胀可忽略不计;同时忽略胶囊壁厚。

(3) 除 PCM 的密度变化符合 Boussinesq 近似,其余物性参数被认为是常数。

(4) 忽略固体 PCM 的运动,即仅考虑 PCM 的约束熔化过程。

(5) 整个模拟过程中的流动及传热都是旋转轴对称的,故模拟过程中可简化为 2D 旋转轴对称模型。

利用 Fluent 对胶囊内约束熔化与凝固过程进行模拟。将 4 种不同封装形状的 PCM 胶囊置于阻塞率^[17] ($B = d/D$) 为 0.5 的流场中;并且在建立模型时,2D 模型的回转轴必须是 X 轴,2D 模型必须位于 X 轴上方。图 1 展示了案例 1 的网格示意图。

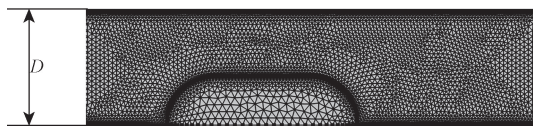


图 1 胶囊网格划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of capsule meshing

1.2 控制方程

基于第 1.1 节中的假设,采用焓-孔隙率法^[31-32]对 PCM 的相变过程进行求解。其中 PCM 的连续性方程为

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \rho \mathbf{v} \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla p + \mathbf{S}_b + \mathbf{S}_m \quad (2)$$

能量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (3)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; \mathbf{u} 为速度矢量, m/s ; t 为时间, s ; \mathbf{v} 为运动黏度, m^2/s ; p 为压力, Pa ; H 为比焓, kJ/kg ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$ 。 \mathbf{S}_b 与 \mathbf{S}_m 分别为浮力源项和达西阻力源项,其中浮力源项 \mathbf{S}_b 的计算式为

$$\mathbf{S}_b = -\rho g \beta (T - T_{\text{ref}}) \quad (4)$$

而达西阻力源项 \mathbf{S}_m 的计算式为

$$\mathbf{S}_m = -C \frac{(1 - \alpha)^2}{\alpha^3 + \varepsilon} \mathbf{u} \quad (5)$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ; β 为热膨胀系数, K^{-1} ; T_{ref} 为参考温度,通常设为 PCM 的熔化温度, $^{\circ}\text{C}$; C 为熔融前沿形态常数,取 $1 \times 10^5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$;而 ε 则是为了避免分母为零所取的一个较小计算常数,

为 0.001。

PCM 的液相分数 α 的计算式^[29]为

$$\alpha = \begin{cases} 0, & T \leq T_{m2} \\ \frac{T - T_{m2}}{T_{m1} - T_{m2}}, & T_{m2} < T < T_{m1} \\ 1, & T \geq T_{m1} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: T_{m1} 与 T_{m2} 分别为 PCM 的液相线与固相线, $^{\circ}\text{C}$ 。

另外,对于式(3)中 PCM 的比焓 H ,其计算式为

$$H = H_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT + \alpha L \quad (7)$$

式(7)中: H_{ref} 为参考焓, kJ/kg ; c_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; L 为相变潜热, kJ/kg 。

2 模型及无关性验证

2.1 模型验证

为保证数学模型的正确性,选用 Li 等^[25] 的实验结果进行对比。取球形胶囊内径为 101.66 mm,恒温壁面为 40 $^{\circ}\text{C}$,初始温度为 27.2 $^{\circ}\text{C}$ 。对比正十八烷在熔化过程中的液相体积分数,如图 2 所示。

由图 2 可知,模拟结果与实验结果的吻合度较高,液相分数的模拟结果与实验结果间的绝对百分比误差 (mean absolute percentage error, MAPE) 为 4.77%,小于 5%,说明本文所选用的数学模型是正确的,其计算结果是可信的。

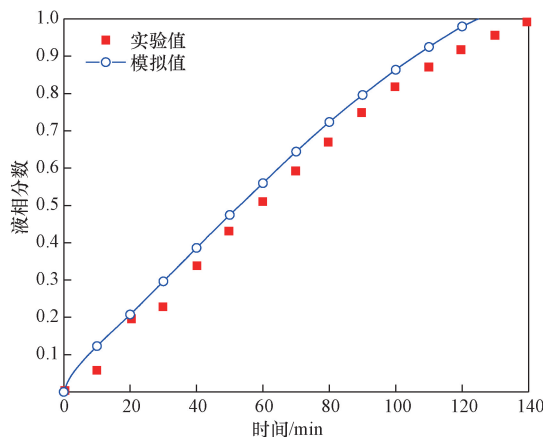


图 2 不同无量纲高度处的 PCM 温度变化

Fig. 2 PCM temperature changes at different dimensionless heights

2.2 网格及时间的无关性验证

为保证数值模拟结果的正确性,有必要对网格数量及时间步长进行无关性验证。本文中针对案例 2 胶囊选取 4 种网格尺寸及时间步长进行模拟,网格数量分别为 3 340、6 353、9 724 与 13 339;时间步长分别为 0.05、0.01、0.2、0.5 s。对比 PCM 胶囊在 30 min 时的液相率,其计算结果如图 3 所示。

由图 3 可知,当网格数量达到 6 353 时,时间步长取 0.1 s 时,再增加网格数量或再减小时间步长对 30 min 时 PCM 的液相率影响较小。因此,考虑到计算精度和计算时间,可取网格数量为 6 353,时间步长为 0.1 s 进行后续仿真计算。

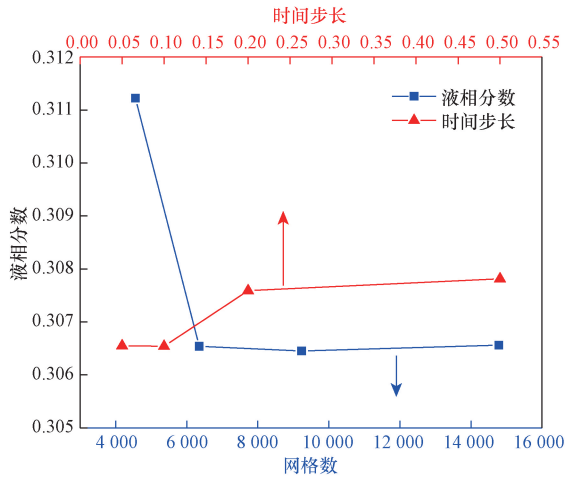


图 3 网格及时间步长无关性验证

Fig. 3 Independence verification of grid and time step

3 模拟结果与分析

通过对比各 PCM 胶囊在相同时间下的温度、流线及液相分布云图,以分析封装形状对 PCM 熔化及凝固过程的影响。最后综合 PCM 胶囊在熔化过程与凝固过程中的表现,指出了 PCM 胶囊的最佳封装形状。

表 3 为模拟过程中各模拟参数值。此外,根据流速可计算出 HTF 的流动状态为层流,故选取层流模型。模拟时的能量方程残差设为 1×10^{-6} ,连续性方程与动量方程的残差为 1×10^{-3} 。

表 3 模拟参数值

Table 3 Simulation parameter values

参数	熔化过程	凝固过程
初始温度/°C	30	60
进口温度/°C	60	30
进口流速/(m·s ⁻¹)	0.1	0.1

3.1 蓄热过程

在填充床储热罐的储热过程中,HTF 的流动方向一般与重力方向相同,而在放热过程中则相反。因此,本节在模拟 PCM 胶囊的熔化过程中也采用了相同的设置。图 4 为 4 种案例在熔化时间为 30、60、120 min 时,胶囊内 PCM 的温度分布、流线分布及液相分数云图。

从图 4 中可知,受热流体流动方向及重力场方向的影响,胶囊顶部的换热效果更好,PCM 温升速率

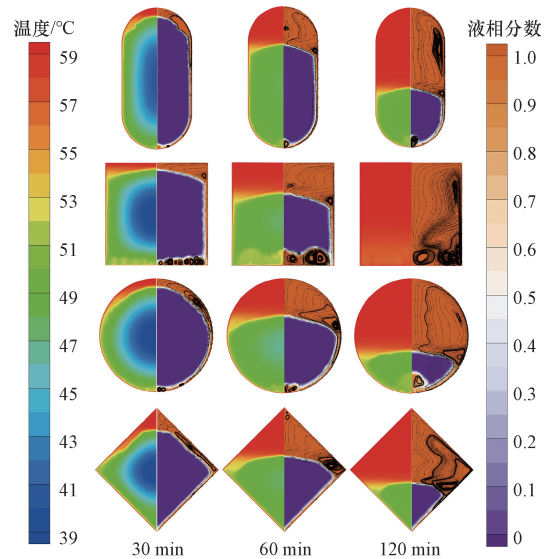


图 4 熔化过程中 PCM 流线分布及液相分布云图

Fig. 4 PCM flow line distribution and liquid phase distribution cloud diagram of melting process

及熔化速率最快。在 30 min 时,固态 PCM 以导热方式传递热量,其温度几乎呈“同心状”分布,胶囊中心仍保持较低温度。而液态 PCM 主要以自然对流方式进行热传递过程,在其胶囊上半部分会形成一个由壁面向上流动的涡流。另外,在案例 2 与案例 3 中还可以看到,胶囊底部也形成了若干个较为明显的涡流。这是因为在靠近壁面处的液态 PCM 温度高,密度小;而处于糊状区附近的液态 PCM 温度低,密度大。故在重力的作用下,壁面附近的液态 PCM 受浮升力的影响向上流动,糊状区附近的液态 PCM 则因为密度大而向下流动,由此便在胶囊上部形成了涡流。

随着熔化时间的延长,越来越多的固态 PCM 开始熔化,并且由于自然对流的作用,胶囊顶部的 PCM 熔化速度更快。在 60 min 时,胶囊内固态 PCM 的温度逐渐上升至最低熔点温度附近。而在液态 PCM 区域,胶囊上半部分的涡中心下移,涡流强度提高;同时胶囊底部的小涡合并,形成大涡,涡流强度增加,对流区域增大,上升的热流体会不断冲刷熔化边界,加速 PCM 的熔化过程。案例 1 与案例 3 的胶囊底部出现明显的涡流线;案例 2 中胶囊底部涡流强度最大;案例 4 受胶囊壁面形状的影响,其胶囊底部并未形成明显的涡流现象。因此,案例 2 中胶囊底部的 PCM 熔化速率最快,案例 4 最慢。

在熔化后期(120 min),案例 2 胶囊内的 PCM 已完全熔化,在没有了固态 PCM 的阻碍后,胶囊底部的涡流强度达到最大,液态 PCM 的扰动变得剧烈,温度差异迅速变小,液态 PCM 温度趋于 60 °C。而在其他未完全熔化的胶囊中,固态 PCM 的温度变化不大,仍

保持在熔点温度附近。在案例 4 中, PCM 呈现出紧贴底部壁面的熔化方式。这是因为从顶部流下的温度高的液态 PCM, 受固态 PCM 的阻碍, 会沿着固态 PCM 表面流动, 流向胶囊壁面处; 受热后又会沿着壁面重新流向胶囊顶部, 形成涡流, 并以此方式循环流动, 不断冲刷固态 PCM, 直至 PCM 完全熔化。

图 5 展示了熔化过程中, 不同封装形状胶囊的液相分数变化。可以看出案例 2 的熔化速率最快, 在 115 min 时完全熔化; 案例 3 最慢, 在 200 min 时才能完全熔化。一方面是由于胶囊形状约束了内部液态 PCM 的对流运动, 另一方面则是不同封装形状会影响胶囊的表面积大小。以胶囊的表面积与体积之比 S^* 表征单位体积下的换热面积大小, 如图 6 所示。结合图 5 可以看出, 胶囊中 PCM 所需的熔化时间与 S^* 的大小密切相关。 S^* 越大, PCM 所需熔化时间越短。并且胶囊底部的涡流强度大小并不是影响 PCM 熔化速率的关键因素, 真正起主导作用的是 PCM 在单位体积下的换热面积大小。

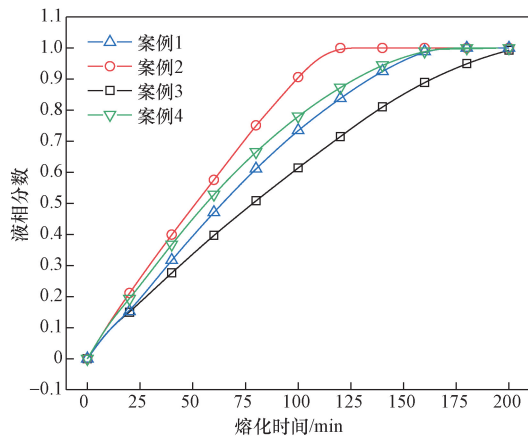


图 5 熔化过程不同形状胶囊的液体分数变化
Fig. 5 Variation of liquid fraction of different shaped capsules during melting

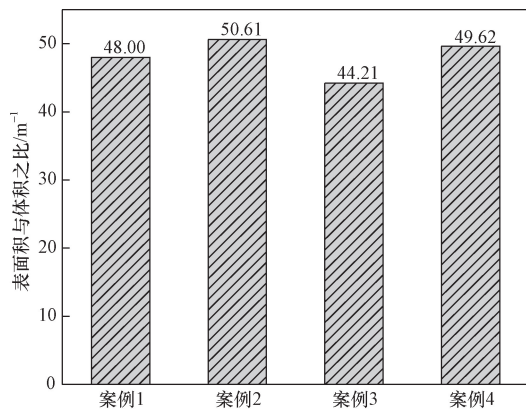


图 6 不同形状胶囊的表面积与体积之比
Fig. 6 Ratio of surface area to volume of capsules of different shapes

3.2 放热过程

如第 3.1 节所述, 在放热过程中, HTF 的流动方向通常设置为与重力相反的方向。图 7 为 4 种案例在凝固时间为 30、60、120 min 时, 胶囊内 PCM 的温度分布、流线分布及液相分数云图。

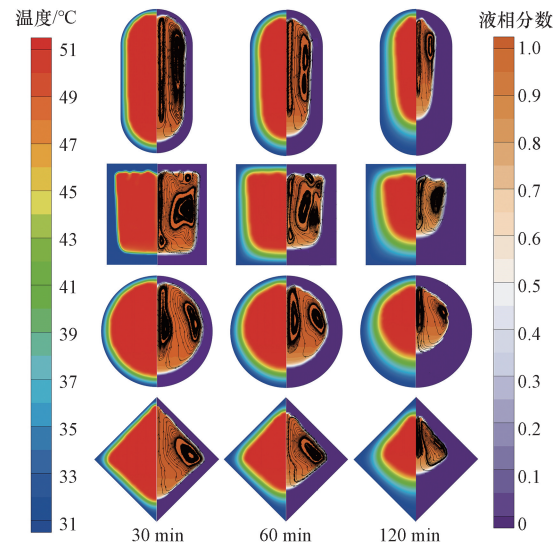


图 7 凝固过程的 PCM 流线分布及液相分布云图
Fig. 7 PCM flow line distribution and liquid phase distribution cloud diagram of solidification process

在 30 min 时, 与熔化状态相似, 4 种封装形状的 PCM 胶囊均呈“同心状”的凝固, 固液 PCM 间的温度分界面明显, 液态 PCM 温度已降低至最高熔点温度附近。但值得注意的是, 胶囊内的液态 PCM 的流动方向与熔化过程是不一样的。在凝固过程中, 近壁面处的液态 PCM 温度低, 密度大; 远壁面处的液态 PCM 温度高, 密度小。故而会在胶囊内部形成沿壁面向下流动的涡流, 这会加速胶囊底部 PCM 的凝固。此外, 在案例 1 ~ 案例 3 中, 胶囊中心轴线附近还会形成一个额外的涡流。这是因为胶囊顶部中心轴线附近的低温液态 PCM 在重力的作用下, 会直接向下流动, 而无法沿着侧壁面向胶囊底部流动, 故而会在胶囊中心轴线处形成涡流, 这同样会导致胶囊中心轴线处的液态 PCM 凝固速率更快。

在 60 min 时, 可以明显看出固液 PCM 间的温度过渡区间变厚, 温度梯度减小。同时, 胶囊底部 PCM 的凝固界面要略高于温度分界面。这是因为凝固后的 PCM 仅以导热方式传递热量, 其温度下降速率较低, 从而扩大了温度过渡区间; 另外, 处于糊状区附近的固态 PCM 刚完成潜热释放阶段, 其温度仍接近于最低熔点温度, 故在温度云图中表现出高于过渡区间的温度。

在 120 min 时, 受 HTF 流动方向及胶囊内自然对流的影响, 胶囊底部 PCM 的凝固速率要明显快于

顶部。固态 PCM 温度过渡区间进一步变厚,液态 PCM 区域变小,自然对流强度减弱。到 120 min 时,案例 2 中的 PCM 仍未达到完全凝固状态,说明凝固时 PCM 的相变速率是要慢于熔化过程的。这一点可通过提取凝固过程中胶囊内的实时液相分数证明,具体如图 8 所示。

通过图 8 可知,凝固时间越长,其凝固速率越慢。在凝固前期,仅需要 25 min 左右,胶囊内就已经有近 50% 的 PCM 凝固;但到了凝固后期 (> 150 min),在 50 min 的时间内,其 PCM 的液相分数仅改变了 6% 左右。这是因为凝固后的固态 PCM 导热系数较低,增大了传热热阻;同时液态 PCM 的区域不断变小,导致自然对流效果变弱,进一步的减慢了 PCM 的凝固速率。并且,纵观整个凝固过程,可以发现胶囊表面积与体积之比对凝固速率的影响较小,但仍会小幅度的加快胶囊内 PCM 的凝固。

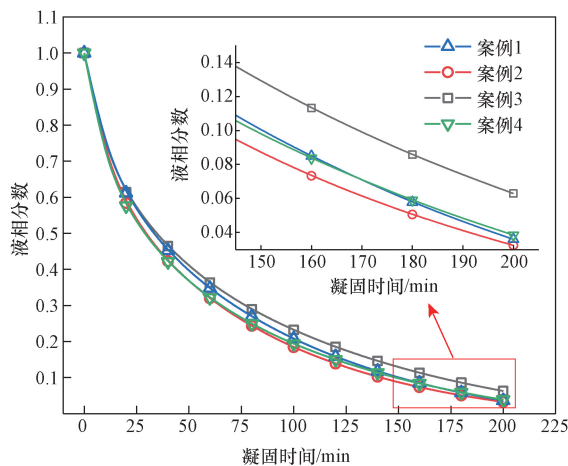


图 8 凝固过程不同形状胶囊的液相分数变化
Fig. 8 Variation of liquid fraction of different shaped capsules during solidification

4 结论

在保证单个 PCM 胶囊体积一致的情况下,建立了 4 种不同封装形状的 PCM 胶囊,以研究封装形状对 PCM 熔化及凝固速率的影响,具体结论如下:

(1) 在熔化过程中,胶囊内部液态 PCM 的自然对流可加速固态 PCM 的熔化,但对熔化速率起决定作用是单位体积下的换热面积。4 种封装形状中,圆柱形胶囊单位体积下的换热面积最大,熔化速率最快。

(2) 在凝固过程中,固态 PCM 主要以导热方式传递热量,而其较低的导热系数增大了传热过程中的热阻,导致放热时间越长,其凝固速率越慢。并且封装形状对胶囊凝固速率的影响较小,但仍会加速 PCM 的凝固速率。

综上所述,在体积一致的情况下,圆柱形封装比球形封装拥有更快的蓄放热速率。本研究结果在国民经济建设中具有重要意义。优化后的 PCM 胶囊可提高能源利用效率,减少能源浪费,推动绿色经济发展;同时,其高效储热性能有助于可再生能源的有效利用,提升能源系统的稳定性和可持续性。此外,改进的 PCM 胶囊在工业热管理和建筑节能中表现出显著优势,能够提升生产效率、降低能耗,促进节能减排。总之,优化封装形状的 PCM 胶囊为提升能源利用效率提供了新的解决方案。

参考文献

- [1] 庞新富, 张旭, 刘莉, 等. 含储热装置的热电联产系统改进人工蜂群优化调度方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(27): 12006-12015.
Pang Xinfu, Zhang Xu, Liu Li, et al. Improved artificial bee colony optimal scheduling method for cogeneration system containing heat storage device [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(27): 12006-12015.
- [2] 丁志雄, 陈友明. 带相变储能的太阳能热水系统分析[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(34): 45-49.
Ding Zhixiong, Chen Youming. Analysis of solar water heating system with phase change energy storage [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(34): 45-49.
- [3] 余妍, 刘方. 含相变储热的喷射式热泵系统模拟与优化[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(11): 4359-4366.
Yu Yan, Liu Fang. Simulation and optimisation of jet heat pump system containing phase change heat storage [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(11): 4359-4366.
- [4] 李昭, 李宝让, 陈豪志, 等. 相变储热技术研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(12): 5066-5085.
Li Zhao, Li Baorang, Chen Haozhi, et al. Research progress of phase change heat storage technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(12): 5066-5085.
- [5] 王关皓, 庄依杰, 朱庆勇. 基于分形的多孔介质复合相变材料的储热特性[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(29): 11858-11866.
Wang Guanhao, Zhong Yijie, Zhu Qingyong. Thermal storage properties of fractal-based composite phase change materials with porous media [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(29): 11858-11866.
- [6] Revankar S T, Croy T. Visualization study of the shrinkage void distribution in thermal energy storage capsules of different geometry, [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2007, 31(3): 181-189.
- [7] Wei J, Kawaguchi Y, Hirano S, et al. Study on a PCM heat storage system for rapid heat supply [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(17/18): 2903-2920.
- [8] Cheng X, Zhai X X. Thermal performance analysis of a novel PCM capsule in red blood cell shape [J]. Applied Thermal Engineering Design Processes Equipment Economics, 2017, 120: 130-137.
- [9] Mohaghegh M R, Alomair Y, Alomair M, et al. Melting of PCM inside a novel encapsulation design for thermal energy storage system

- [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 11: 100098.
- [10] Yan D, Wang F Q, Zhang Y Q, et al. Experimental and numerical study on flow characteristic and thermal performance of macro-capsules phase change material with biomimetic oval structure[J]. *Energy*, 2021, 4: 121830.
- [11] Koizumi H. Time and spatial heat transfer performance around an isothermally heated sphere placed in a uniform, downwardly directed flow(in relation to the enhancement of latent heat storage rate in a spherical capsule)[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(17/18): 2583-2600.
- [12] 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]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 100: 1063-1075.
- [13] Govindaraj K, Panchabikesan K, Denkenberger D C, et al. Effect of fin orientations in a spherically encapsulated phase change materials for effective heat transfer enhancement [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2017, 62: 277-282.
- [14] Aziz S, Amin N A M, Abdul M M S, et al. CFD simulation of a TES tank comprising a PCM encapsulated in sphere with heat transfer enhancement[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 143: 1085-1092.
- [15] Jia X, Zhai X, Cheng X, Thermal performance analysis and optimization of a spherical PCM capsule with pin-fins for cold storage [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 148: 929-938.
- [16] He X, Qiu J, Wang W, et al. A review on numerical simulation, optimization design and applications of packed-bed latent thermal energy storage system with spherical capsules[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51: 104555.
- [17] 王凌皓, 刘方. 含球形相变胶囊的混合储能水箱特性模拟研究[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(4): 1534-1541.
Wang Linghao, Liu Fang. Simulation study on the characteristics of hybrid energy storage tank containing spherical phase change capsules[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(4): 1534-1541.
- [18] Gao Z, Yao Y, Wu H, A visualization study on the unconstrained melting of paraffin in spherical container[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 155: 428-436.
- [19] Solomon L, Elmozoughi A F, Oztekin A, et al. Effect of internal void placement on the heat transfer performance: encapsulated phase change material for energy storage[J]. *Renewable Energy*, 2015, 78: 438-447.
- [20] Archibold A R, Gonzalez-Aguilar J, Rahman M M, et al. The melting process of storage materials with relatively high phase change temperatures in partially filled spherical shells[J]. *Applied Energy*, 2014, 116: 243-252.
- [21] Tan F L. Constrained and unconstrained melting inside a sphere [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2008, 35(4): 466-475.
- [22] Kenisarin M M, Mahkamov K, Costa S C, et al. Melting and solidification of PCMs inside a spherical capsule: a critical review [J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 27: 101082.
- [23] Khodadadi J M, Zhang Y. Effects of buoyancy-driven convection on melting within spherical containers[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2001, 44(8): 1605-1618.
- [24] Tan F L, Hosseinizadeh S F, Khodadadi J M, et al. Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials(PCM) inside a spherical capsule [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2009, 52(15/16): 3464-3472.
- [25] Li W, Li S, Guan S, et al. Numerical study on melt fraction during melting of phase change material inside a sphere[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(29): 18232-18239.
- [26] Khot S A, Sane N K, Gawali B S. Experimental investigation of phase change phenomena of paraffin wax inside a capsule[J]. *International Journal of Engineering Trends & Technology*, 2011(2): 67-71.
- [27] Sattari H, Mohebbi A, Afsahi M M, et al. CFD simulation of melting process of phase change materials(PCMs) in a spherical capsule[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 73: 209-218.
- [28] 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.
- [29] 刘英光. 一种相变换热装置[P]. CN212227830U, 2020-12-25.
Liu Yingguang. A phase conversion thermal device [P]. CN212227830U, 2020-12-25.
- [30] Yang L, Zhang X S, Xu G Y. Thermal performance of a solar storage packed bed using spherical capsules filled with PCM having different melting points [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 68: 639-646.
- [31] Gao Z, Yao Y, Wu H. Validation of a melting fraction-based effective thermal conductivity correlation for prediction of melting phase change inside a sphere[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 142: 247-257.
- [32] 陈宝明, 郜凯凯, 姜昊. 固-液相变糊状区的格子 Boltzmann 研究[J]. *工程热物理论*, 2017, 38(11): 2453-2460.
Chen Baoming, Gao Kaikai, Jiang Hao. Study on lattice Boltzmann in the paste-like zone of solid-liquid phase transition [J]. *Chinese Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(11): 2453-2460.