

# 空穴效应下泡沫金属复合相变材料热性能数值模拟\*

潘涵婷, 许多, 徐洪涛, 罗祝清

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 在三维泡沫金属复合相变材料(PCM)基础上,构建了随机分布空穴模型,采用多松弛时间格子 Boltzmann 方法,从孔隙尺度分析了不同空穴体积分数、分布位置及泡沫金属与 PCM 导热系数比下的空穴效应.结果表明,随着空穴体积分数的增加,减缓了复合 PCM 的传热速度,并降低了潜热储能的能力.在 Fourier 数  $Fo = 0.7$  时刻下,当空穴体积分数分别为 2.4%, 7.6% 和 11.7% 时,相较于无空穴情况下的储热量分别减少了 3.2%, 9.0% 和 13.0%.当体积分数为 3% 的空穴集中在热壁面侧时,其对复合 PCM 熔化过程的阻碍作用最显著,此时空穴层相当于绝热层,使复合 PCM 的整体熔化时间延长了 6.1%.为削弱空穴效应,可选择导热系数比超过 100 的泡沫金属骨架来提高其在传热中的主导作用.

**关键词:** 相变; 泡沫金属; 空穴; 熔化; 格子 Boltzmann 方法

**中图分类号:** TK124; O351.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.440082

## Numerical Analysis on Thermal Performances of Metal Foam Composite Phase Change Materials Under Cavity Effects

PAN Hanting, XU Duo, XU Hongtao, LUO Zhuqing

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, P.R.China)

**Abstract:** A randomly distributed cavity model was constructed for 3D metal foam composite phase change materials (PCMs), and the multi-relaxation time lattice Boltzmann method was used to explore the cavity effects with different volume fractions, distribution locations, and thermal conductivity ratios of metal foam to PCM at the cavity scale. The results show that, with the increase of the cavity volume fraction, the heat transfer rate and latent heat storage capacity of composite PCMs would decrease. At a Fourier number of 0.7, compared to the case without cavity, the heat storage decreases respectively by 3.2%, 9.0%, and 13.0% for a cavity volume fraction of 2.4%, 7.6%, and 11.7%, respectively. The significant hindering effect on the melting process of composite PCMs occurs in the case of cavities with a volume fraction of 3% and concentrated near the high-temperature wall. The cavities act as an adiabatic layer, extending the complete melting time of composite PCMs by 6.1%. To weaken the cavity effect, the metal foam skeleton with a thermal conductivity ratio of more than 100 can be selected to improve its leading role in heat transfer.

\* 收稿日期: 2023-03-27; 修订日期: 2023-09-14

基金项目: 上海市自然科学基金(面上项目)(20ZR1438700)

作者简介: 潘涵婷(1999—),女,硕士生(E-mail: 1041580589@qq.com);

徐洪涛(1976—),男,教授,博士,博士生导师(通讯作者. E-mail: htxu@usst.edu.cn).

引用格式: 潘涵婷, 许多, 徐洪涛, 罗祝清. 空穴效应下泡沫金属复合相变材料热性能数值模拟[J]. 应用数学和力学, 2024, 45(1): 85-96.

**Key words:** phase change; metal foam; cavity; melting; lattice Boltzmann method

## 0 引言

人类社会的发展与能源密切相关,为解决能源紧缺及环境污染等问题,开发利用可再生能源已成为必由之路<sup>[1]</sup>.风能、太阳能等可再生能源不排放温室气体,对环境污染小,但均存在稳定性差及时间、空间分布不均的缺点<sup>[2]</sup>,因此迫切需要发展储能技术.由于相变材料(phase change material, PCM)具有较高的储能密度和在近乎恒定温度下释放或吸收热量的特性,从根本上平衡了能量供需之间的矛盾<sup>[3]</sup>.目前,利用 PCM 来进行潜热储能被广泛应用于太阳能发电系统<sup>[4]</sup>、余热利用<sup>[5]</sup>、电池热管理系统<sup>[6]</sup>、航天航空仪器恒温及动力供应<sup>[7]</sup>等领域.

然而传统 PCM 普遍存在导热率低的问题,填充泡沫金属骨架是当前一种有效的解决方案<sup>[8-9]</sup>.Huang 等<sup>[10]</sup>通过研究泡沫金属复合 PCM 的传热性能,发现其在较高的孔隙率下能够加快 PCM 的熔化速度.Yang 等<sup>[11]</sup>利用蓄放热实验研究了纳米颗粒与泡沫金属对不同 PCM 传热性能的影响,研究表明泡沫金属在缩短凝固及熔化时间上比纳米颗粒更具优势.马预谱等<sup>[12]</sup>研究发现在储能密度方面,泡沫金属铜的性能优于铝翅片.上述文献都表明了泡沫金属骨架对于相变传热的增益作用.

此外,PCM 会在相变过程中重复收缩膨胀,产生局部压力,导致在内部空间产生充满气体的空穴,从而引发热应力集中分布,对 PCM 的使用寿命造成损伤<sup>[13-14]</sup>.Chiew 等<sup>[15]</sup>通过实验研究了两种 PCM 储能系统(100%的 PCM 与带有 20%空穴的 PCM),研究表明空穴的作用类似绝热层,明显削弱了系统的储热性能.Janghel 等<sup>[16]</sup>提出了考虑空穴存在的半解析模型,分析了其在 PCM 凝固过程中的影响,结果表明形成于冷壁上的空穴会降低凝固速度,使凝固时间变长.Solomon 等<sup>[17]</sup>分析了内部空穴位置对相变胶囊储能性能的影响,发现当空穴集中分布于胶囊中心时,PCM 的完全熔化时间最短,相比于随机分布及集中顶部的情况,分别快 22%与 39%.Li 等<sup>[18]</sup>分析了微重力条件下复合 PCM 中空穴体积分数对储能性能的影响,研究发现仅在热传导作用下,近壁空穴和随机分布空穴的储能量均随空穴体积分数的增加而减小.

由于泡沫金属的复杂结构,针对复合 PCM 熔化过程中的空穴问题研究尚少,并未明确其传热机理.此外,模拟工作大多采用二维模型,忽略了泡沫金属骨架的三维效应.本文通过构建三维复合 PCM 模型,克服了二维泡沫金属骨架导热性不连通的问题.同时,为模拟相变过程中存在的空穴效应,本文提出了一种随机分布的空穴结构.基于焓法的多松弛时间格子 Boltzmann 方法(multiple-relaxation time lattice Boltzmann method, MRT-LBM),对于处理复杂固液相变界面运动及边界条件有着很大优势<sup>[19-20]</sup>,且依靠高性能计算显卡(GPU)大幅减少模拟计算时间成本<sup>[21]</sup>.

因此,本文采用 GPU 加速 MRT-LBM,基于泡沫金属骨架强化传热下的复合 PCM,对不同空穴体积分数、空穴分布位置及骨架导热系数比下的瞬态熔化过程进行数值模拟,进而探究随机分布空穴对于复合 PCM 熔化性能的影响效应.

## 1 物理与数学模型

### 1.1 物理模型

泡沫金属结构是由骨架和孔隙空间组成,如图 1(a)所示.结合实际骨架结构,本文首先建立了三维复合 PCM 模型(孔隙率为 0.956),如图 1(b)所示.图 1(c)为在此模型基础上构建了随机分布空穴结构,方腔的  $L:W:H$  为  $2:1:2$ ,左壁面设置为高温面,其余面为绝热面,其中,球形空穴尺寸为方腔长度  $L$  的  $1/35$ .图 1(d)—1(g)为 4 种不同空穴分布位置模型,同时固定空穴的体积分数为 3%,其中方腔内空白部分均填充 PCM,深蓝色网状结构代表泡沫金属骨架模型,灰色球体代表空穴.

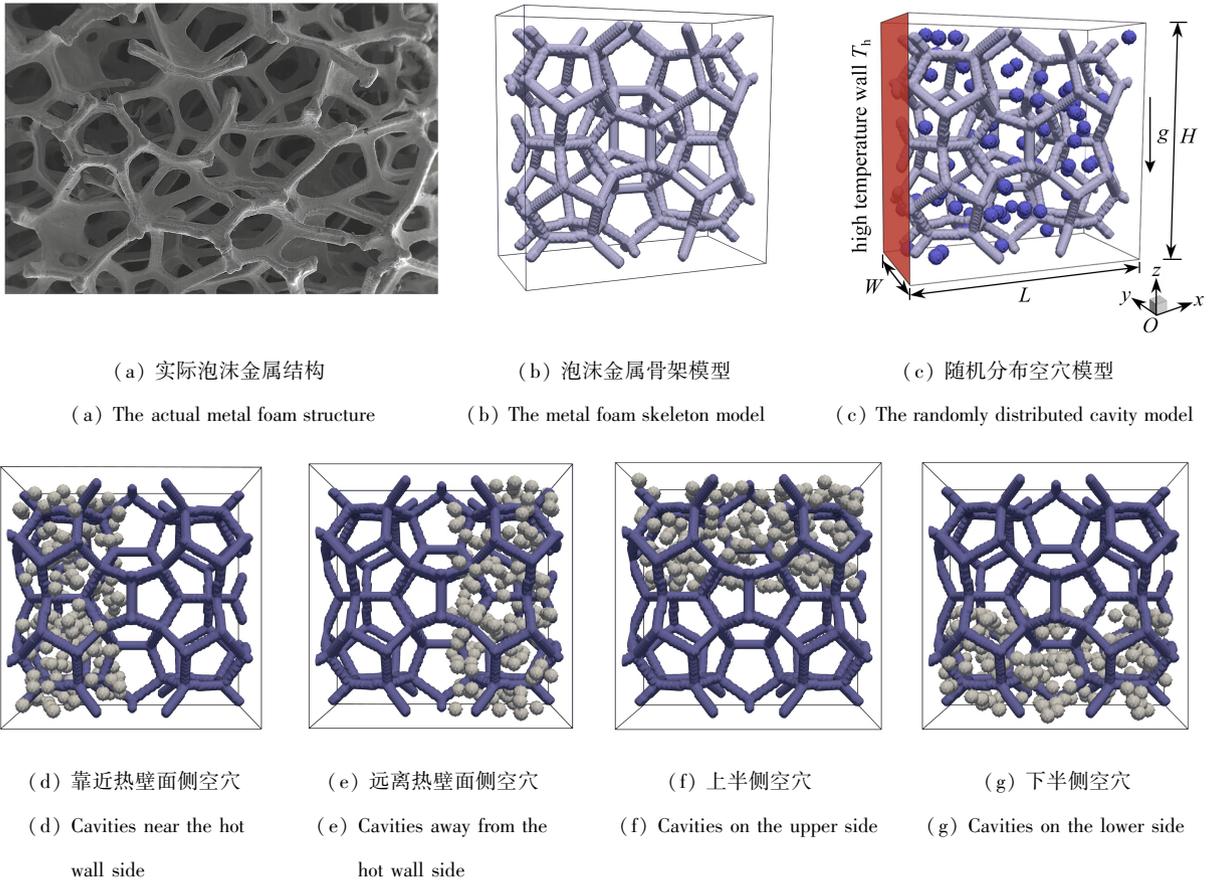


图 1 三维模型介绍

Fig. 1 The introduction of three-dimensional models

注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本,后同。

## 1.2 数学模型

复合 PCM 的相变过程采用了以下假设:

- ① 根据 Boussinesq 假设,PCM 被认为层流、不可压缩的;
- ② 除了导热率,PCM 的液体和固体热物性可认为是一致的;
- ③ 忽略空穴内的相变问题,同时它们的位置和形状不随时间改变。

空穴体积分数  $\xi$  被定义为

$$\xi = \frac{V_c}{V_d}, \tag{1}$$

式中,  $V_c$  和  $V_d$  分别表示空穴和矩形腔所占网格数。

PCM 各阶段的导热系数  $\lambda_{PCM}$ 、温度  $T$  和液体分数  $f_l$  通过以下公式计算:

$$\lambda_{PCM} = \begin{cases} \lambda_s, & f_l = 0, \\ (1 - f_l)\lambda_s + f_l\lambda_l, & 0 < f_l < 1, \\ \lambda_l, & f_l = 1, \end{cases} \tag{2}$$

$$T = \begin{cases} T_m - \frac{h_s - h_f}{c_{pf}}, & h_f \leq h_s, \\ T_m, & h_s \leq h_f \leq h_l, \\ T_m + \frac{h_f - h_l}{c_{pf}}, & h_f \geq h_l, \end{cases} \tag{3}$$

$$f_l = \begin{cases} 0, & h_f \leq h_s, \\ \frac{h_f - h_s}{h_l - h_s}, & h_s < h_f < h_l, \\ 1, & h_f \geq h_l, \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $T_m$  表示相变温度, K;  $c_p$  表示比热容,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ; 下标 s 和 l 分别表示固态和液态.

PCM、泡沫金属和空穴的焓的定义式如下:

$$h_f = c_{pf}(T - T_m) + f_l L_a, \quad (5)$$

$$h_w = c_{pw}(T - T_m), \quad (6)$$

$$h_v = c_{pv}(T - T_m), \quad (7)$$

式中,  $L_a$  表示潜热,  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 下标 f、w 和 v 分别表示 PCM、泡沫金属和空穴.

本文涉及 4 个无量纲参数: Stefan 数  $S_{te}$ , Prandtl 数  $Pr$ , Rayleigh 数  $Ra$  和 Fourier 数  $Fo$  的定义式如下:

$$S_{te} = \frac{c_{pf}(T_h - T_m)}{L_a}, \quad Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \quad Ra = \frac{g\beta(T_h - T_m)L^3}{\alpha_f \nu_f}, \quad Fo = \frac{\alpha_f t}{L^2}, \quad (8)$$

式中,  $T_h$  为热壁面温度, K;  $\nu_f$  为流体的运动黏度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\alpha_f$  为流体的热扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $\beta$  为热膨胀系数,  $\text{K}^{-1}$ ;  $L$  为特征长度, m.

本文在  $Pr = 1, S_{te} = 0.4, Ra = 25\,000, \lambda_s/\lambda_l = 1.3, \lambda_v/\lambda_l = 0.1$  的工况下进行模拟.

矩形腔的初始和边界条件设定如下:

$$\begin{cases} T(x, y, z) = 0, \quad t = 0, & \text{full square cavity,} \\ u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0, \quad T = 1, & \text{left wall,} \\ u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, & \text{right wall,} \\ u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0, & \text{upper and lower wall,} \\ u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, & \text{front and rear wall,} \\ u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0, & \text{metal foam,} \\ u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0, & \text{cavity,} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  方向上的无量纲速度分量.

## 2 格子 Boltzmann 方法

### 2.1 流体流动

本文采用 D3Q19 模型, 同时选用 Huang 等<sup>[22]</sup> 提出的浸入式移动边界方法, 其分布函数  $f_i$  的演化方程为

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(\mathbf{x}, t) - \frac{1 - B}{\tau_f} + [f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{eq}(\mathbf{x}, t)] + B\Omega_i^s + \Delta t F_i, \quad (10)$$

式中,  $\mathbf{x}$  为粒子的坐标位置,  $\Delta t$  为时间步长.

平衡态分布函数  $f_i^{eq}(\mathbf{x}, t)$  的表达式为

$$f_i^{eq}(\mathbf{x}, t) = \omega_i \rho_f \left[ 1 + \frac{\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u}}{c_s^2} + \frac{(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u})^2}{2c_s^4} - \frac{\mathbf{u}^2}{2c_s^2} \right], \quad (11)$$

式中,  $\omega_i, \mathbf{e}_i$  和  $c_s$  分别为权重系数、离散速度和格子声速.

外力项  $F_i$  定义为

$$F_i = \omega_i \left( 1 - \frac{1}{2\tau_f} \right) \left( \frac{\mathbf{e}_i - \mathbf{u}}{c_s^2} + \frac{\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u}}{c_s^4} \mathbf{e}_i \right) \cdot \mathbf{f}_b, \quad (12)$$

式中, 浮力项  $\mathbf{f}_b = \rho_f \beta \mathbf{g} (T - T_m)$ .

权重函数  $B$  的表达式为

$$B = \frac{(1 - f_i)(\tau_f - 0.5)}{f_i + \tau_f - 0.5}. \quad (13)$$

碰撞算子  $\Omega_i^s$  可通过非平衡态反弹格式进行计算:

$$\Omega_i^s = f_i^s(\mathbf{x}, t) - f_i(\mathbf{x}, t) + f_i^{\text{eq}}(\rho, \mathbf{u}_s) - f_i^{\text{eq}}(\rho, \mathbf{u}), \quad (14)$$

式中,  $\mathbf{u}_s$  代表固态速度,  $\bar{i}$  表示  $i$  的相反方向.

基于以上算式,宏观速度  $\mathbf{u}$  可通过如下公式计算:

$$\rho_f = \sum_{i=0}^{18} f_i, \quad \rho_f \mathbf{u} = \sum_{i=0}^{18} \mathbf{e}_i f_i + \frac{\Delta t}{2} f_b. \quad (15)$$

## 2.2 固液相变

本文采用 Li 等<sup>[23]</sup>提出的基于焓法的 D3Q7 MRT 模型,焓分布函数  $g_i$  表达式为

$$g_i(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \Delta t, t + \Delta t) = g_i(\mathbf{x}, t) - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{S} [\mathbf{m}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{m}^{\text{eq}}(\mathbf{x}, t)]. \quad (16)$$

碰撞过程实现形式为

$$\mathbf{m}(\mathbf{x}, t + \Delta t) = \mathbf{m}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{S} [\mathbf{m}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{m}^{\text{eq}}(\mathbf{x}, t)]. \quad (17)$$

平衡态分布函数  $\mathbf{m}^{\text{eq}}$  定义为

$$\mathbf{m}^{\text{eq}} = \left( h, \frac{c_p T u}{c}, \frac{c_p T v}{c}, \frac{c_p T w}{c}, 6h - 21\omega_\tau c_{p,\text{ref}} T, 0, 0 \right)^T, \quad (18)$$

式中,  $\omega_\tau = 0.25$ .

转换矩阵  $\mathbf{M}$  和松弛矩阵  $\mathbf{S}$  为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 6 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 2 & 2 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\mathbf{S} = \text{diag}(s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7), \quad (20)$$

式中,  $s_1 = 1, s_2 = s_3 = s_4 = 1/\tau, s_5 = s_6 = s_7 = 2 - 1/\tau$ , 松弛时间  $\tau$  的定义式为

$$\tau = \begin{cases} 4 \frac{\lambda_{\text{PCM}}}{\rho_f c_{p,\text{ref}}} + 0.5, & \text{PCM,} \\ 4 \frac{\lambda_w}{\rho_w c_{p,\text{ref}}} + 0.5, & \text{metal foam,} \\ 4 \frac{\lambda_v}{\rho_v c_{p,\text{ref}}} + 0.5, & \text{cavity.} \end{cases} \quad (21)$$

焓值  $h$  通过如下计算式得出:

$$h = \sum_{i=0}^6 g_i. \quad (22)$$

## 3 网格无关性验证及模型验证

为验证复合 PCM 的传热过程和熔化过程,首先对正二十烷 ( $Z < 0$ ) 与金属铜 ( $Z > 0$ ) 界面之间的一维耦合传热过程进行验证,其耦合传热模型图如图 2(a) 所示.图 2(b) 展示了在无量纲位置坐标  $Z$  方向上两种物质的温度分布曲线图,可以发现 LBM 模拟结果与解析解<sup>[24]</sup>吻合良好,验证了 LBM 实现耦合传热过程的准确性.其次,为了准确模拟 PCM 的相变熔化过程,对两组工况下 (case 1:  $Ra = 25\,000, Pr = 0.02, S_{\text{te}} = 0.1$ ; case 2:  $Ra = 25\,000, Pr = 10, S_{\text{te}} = 0.1$ ) 的瞬态熔化过程进行了模拟.PCM 熔化过程中的平均液化率和热壁面 Nusselt 数曲线如图 3 所示,这与 Li 等<sup>[23]</sup>的结果吻合良好.

最后,基于相同的模拟工况,对填充金属骨架的复合 PCM 的熔化过程进行了网格独立性验证.图 4 显示了不同网格数下,随无量纲时间  $Fo$  变化的  $f_{l,ave}$  及  $Nu_{ave}$ ,可以发现不同网格数下的差异非常小,最大误差为 0.82%.基于模型结构的复杂性和计算成本的控制,采用  $140 \times 70 \times 140$  网格数进行后续的工作.

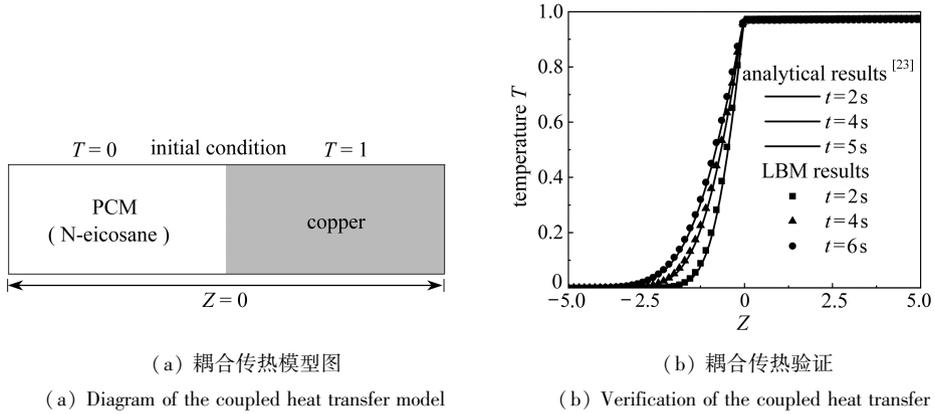


图 2 界面耦合传热验证

Fig. 2 Verification of the interface coupled heat transfer

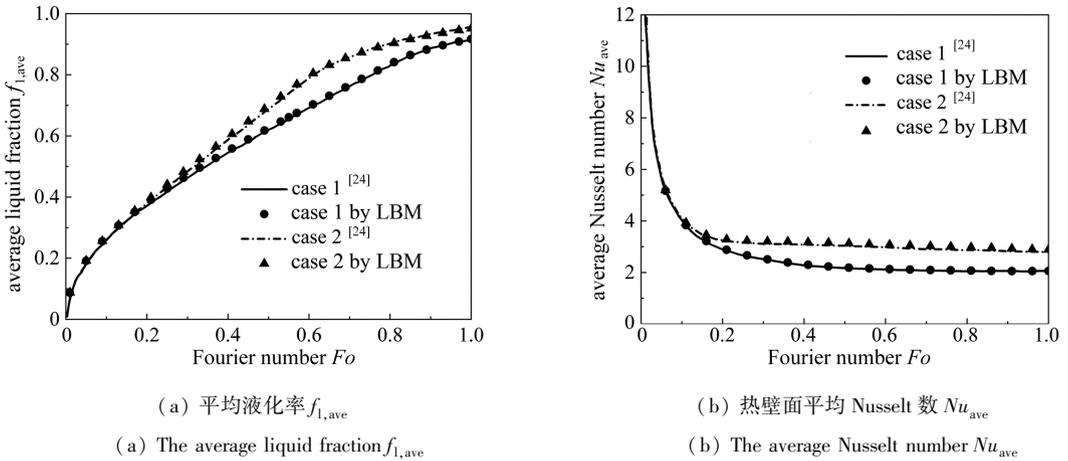


图 3 三维固液相变验证

Fig. 3 The 3D solid-liquid phase change verification

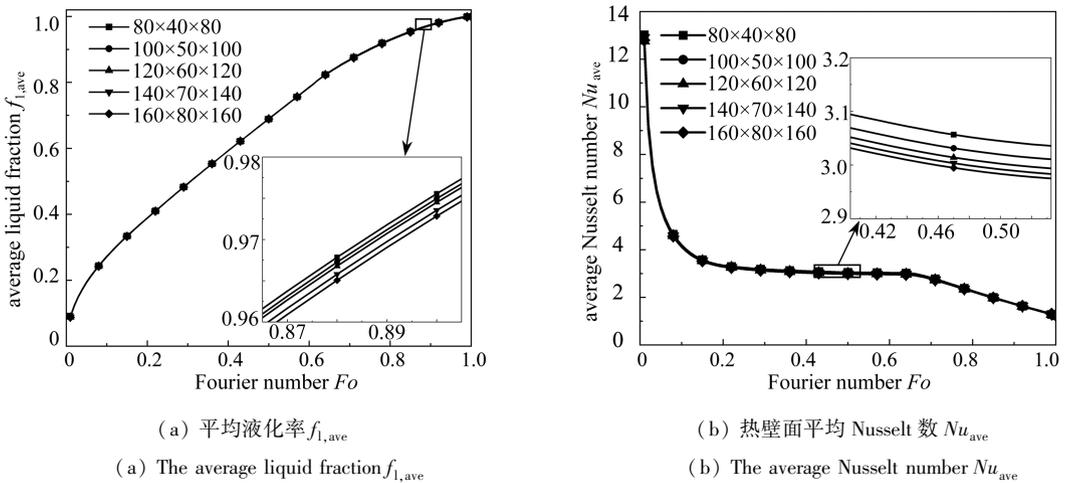


图 4 网格无关性验证

Fig. 4 The grid independence check

## 4 结果与讨论

### 4.1 不同空穴体积分数下复合 PCM 的热性能

为探究空穴耦合作用下复合 PCM 的热性能,对三种不同空穴体积分数 ( $\xi = 0\%, 2.4\%$  和  $7.6\%$ ) 下的整体及截面温度云图进行了对比分析,如图 5 所示.其中,黑色部分表示泡沫金属骨架结构,白色球体表示空穴结构.当  $Fo$  从 0.15 变化到 0.40 时,可以发现 PCM 熔化量增多,固液相界面开始向上弯曲,这是因为在浮升力的驱动作用下,液体 PCM 向上流动,增加了上半部分 PCM 之间的热传递.

此外,随着  $\xi$  的增加,熔化界面的弯曲程度降低,越趋近于平行热壁面,这是因为空穴的存在抑制了自然对流作用.在  $y = 35$  (中间) 处的截面图中可以观察到,空穴附近的等温线比金属骨架附近的等温线更密集,这说明了空穴限制了 PCM 内部的热量传递,同时空穴在矩形腔内分布的位置也会左右其传热特性.

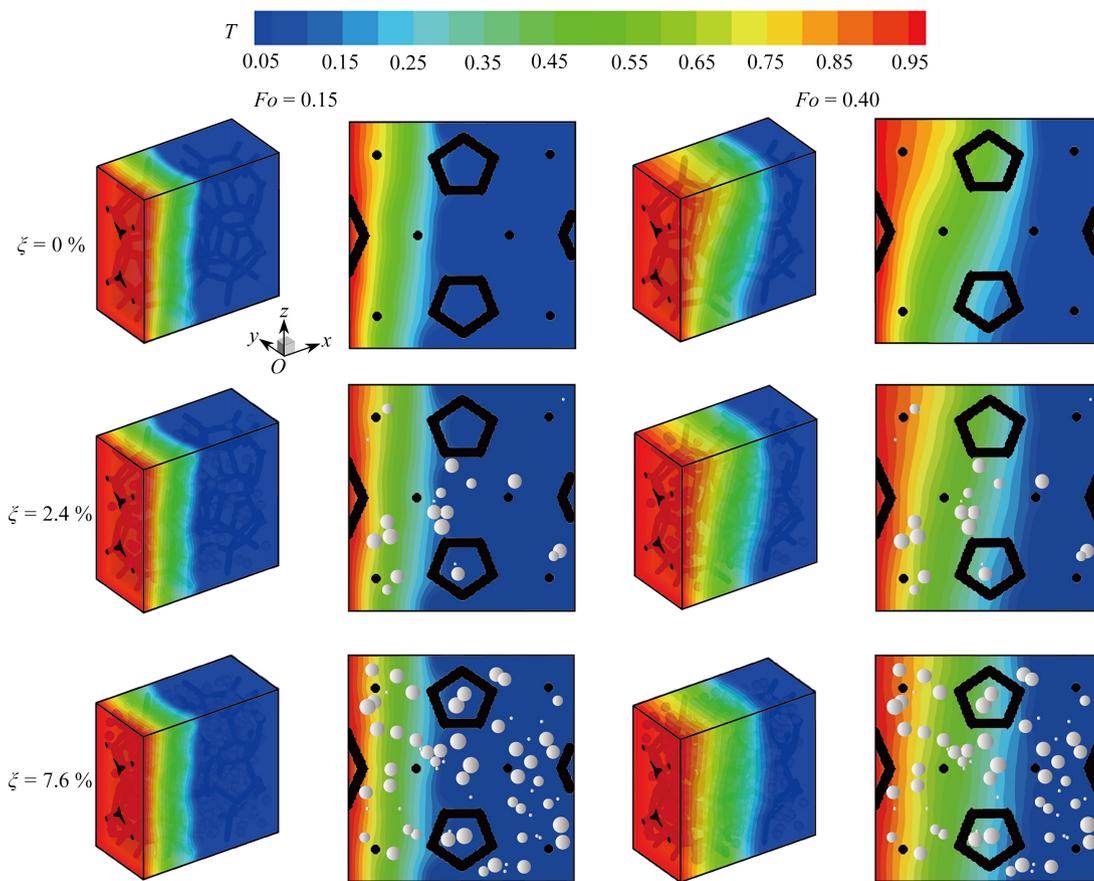


图 5 矩形腔整体及截面处温度分布图

Fig. 5 Temperature distributions of the whole and the cross section of the rectangular cavity

为定量研究复合 PCM 的热性能,引入熔化参考比  $X$  来评价空穴效应,其定义式如下:

$$X_i = \left( \frac{\xi_{i,f_{1,ave}}}{\xi_{0,f_{1,ave}}} - 1 \right) \times 100\%, \quad (23)$$

式中,  $\xi_{i,f_{1,ave}}$  表示不同  $\xi$  下空穴的  $f_{1,ave}$ ,  $\xi_{0,f_{1,ave}}$  表示无空穴情况下的  $f_{1,ave}$ .

图 6(a) 为不同  $\xi$  下的熔化参考比  $X$  曲线.依据曲线趋势,将整个过程划分为三个熔化区域.以  $\xi = 7.6\%$  为例,在阶段 I,由于空穴的存在减少了 PCM 的总量,同时在熔化前期大部分随机分布的空穴尚处于固体 PCM 中,因此空穴效应还未显著影响 PCM 的熔化过程,所以出现  $X$  值大于 0 的情况.在阶段 II,  $X$  值从 0 减小到最小值,随着熔化过程的推进,更多的 PCM 开始熔化,致使更多的空穴存在于液体 PCM 中,这将阻碍 PCM 的熔化过程,因此  $X$  值一直小于 0.此现象可以由以下两个原因来解释:首先,空穴低热导率的特性增加

了过程的传热热阻;其次,空穴的存在增加了自然对流过程中的流动阻力.在阶段Ⅲ,  $X$  值从最小值变化到 0, 熔化过程进入末期, 无空穴的 PCM 最先完全熔化, 因此  $X$  值开始接近于 0, 最终达到稳定.

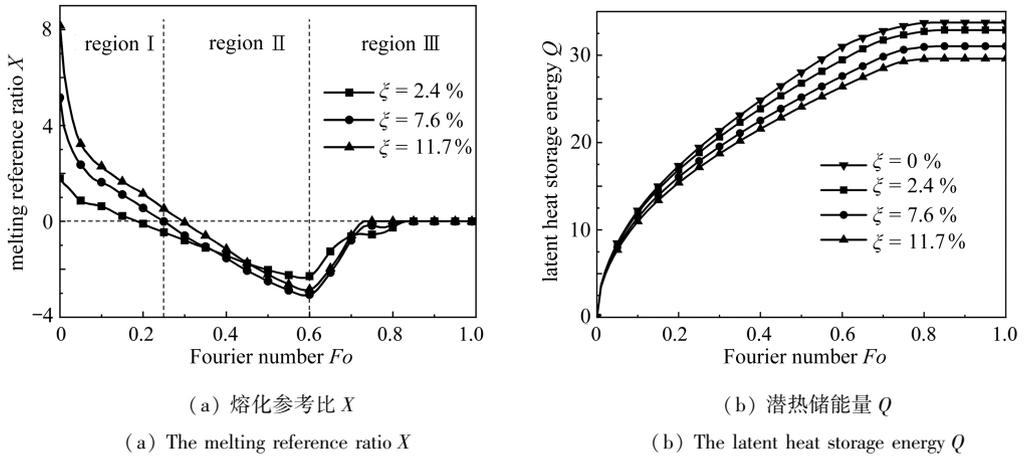


图 6 不同  $\xi$  下复合 PCM 的熔化参考比  $X$  和潜热储能能量  $Q$

Fig. 6 The melting reference ratio  $X$  and latent heat storage energy  $Q$  of composite PCMs with different  $\xi$  values

图 6(b) 为不同  $\xi$  下潜热储能能量  $Q$  的变化曲线图, 可以观察到空穴的存在显著降低了 PCM 的储热能力. 在 Fourier 数  $Fo = 0.7$  时刻下, 当  $\xi = 2.4\%$ ,  $7.6\%$  和  $11.7\%$  时, 相较于无空穴情况下的  $Q$  分别减少了  $3.2\%$ ,  $9.0\%$  和  $13.0\%$ . 这极大地影响了储热容器的储热能力, 因此控制储能单元中空穴的形成对提高储热效率至关重要.

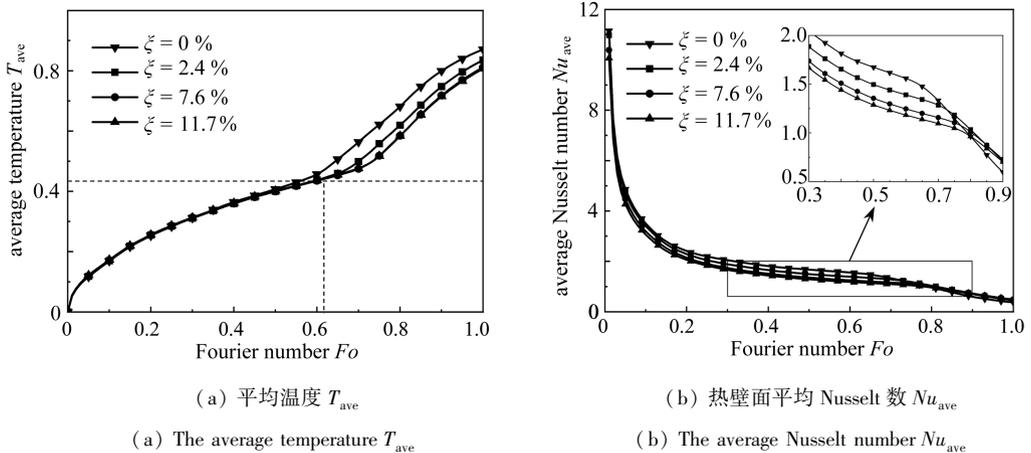


图 7 不同  $\xi$  下复合 PCM 平均温度和热壁面平均 Nusselt 数

Fig. 7 The average temperature and Nusselt number of composite PCMs with different  $\xi$  values

图 7(a) 为随时间变化的不同  $\xi$  下复合 PCM 的平均温度. 在  $Fo = 0.6$  之前, 温度变化比较缓慢, 且有无空穴对复合 PCM 的平均温度没有明显的影响. 当  $Fo > 0.6$  时, 不同  $\xi$  下复合 PCM 内的平均温度出现明显差异, 无空穴时的平均温度最高, 且随着  $\xi$  的增加, 平均温度降低. 这是因为大部分空穴处于液体 PCM 中, 增加了传热热阻, 同时温度差异在显热升温时表现更加明显.

图 7(b) 为不同  $\xi$  情况下热壁面平均 Nusselt 数  $Nu_{ave}$  的变化趋势. 熔化起始阶段, 液体层厚度很小, 温度梯度很大,  $Nu_{ave}$  数值较高. 随着熔化过程的进行,  $Nu_{ave}$  逐渐下降并趋于稳定值, 同时随着空穴数量的增加,  $Nu_{ave}$  值越小, 表明空穴的存在增加了对流的阻碍作用, 从而抑制了流动. 在熔化后期, 随着 PCM 内部温差逐渐减小, 熔化界面因接触到右壁面而面积减小,  $Nu_{ave}$  显著下降, 并趋于 0.

## 4.2 不同空穴位置下复合 PCM 的热性能

根据 4.1 小节的介绍可以知道空穴位置对 PCM 熔化过程有着至关重要的影响. 因此本小节讨论了四种

不同空穴位置分布下复合 PCM 的热性能,且  $\xi = 3.0\%$ .图 8 为不同空穴位置排布下的温度分布图,可以观察到在 PCM 熔化过程中,在无空穴存在时等温线相对平整,而有空穴存在时等温线开始变得密集,且向空穴方向收缩,这说明热量传递的速率减缓.在  $Fo = 0.40$  时,发现随着更多的空穴暴露在液体 PCM 中时,PCM 的熔化界面移动变缓.当空穴集中在远离热壁面侧时,PCM 的熔化界面移动得最快,因为热量从左侧开始向右侧移动,左侧 PCM 中热量传递并未受到空穴的抑制作用.当空穴集中于靠近热壁面侧时,等温线分布最密集,这对热壁面传递热量是最不利的.

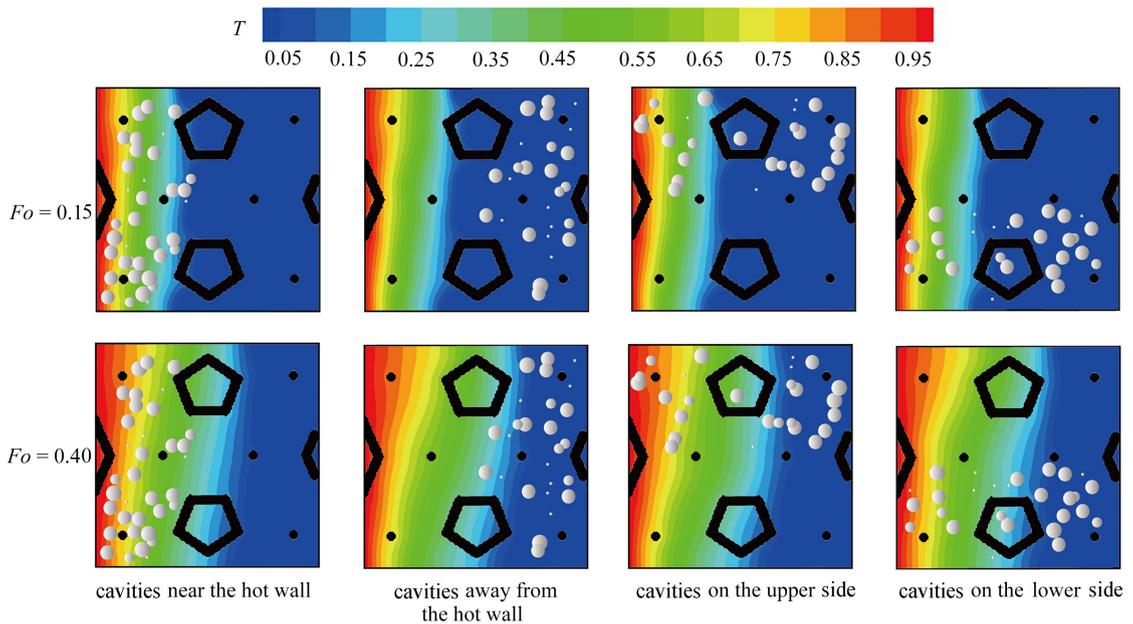


图 8 不同空穴分布位置下的截面  $y = 35$  处的温度分布图 ( $\xi = 3\%$ )

Fig. 8 Temperature contours at  $y = 35$  with different void distribution locations ( $\xi = 3\%$ )

图 9(a)对具有不同空穴位置的 PCM 的熔化参考比  $X$  进行了比较.可以发现当空穴远离热壁面侧时, $X$  曲线先保持不变,说明在这段时间内,空穴效应并未影响 PCM 内部的熔化过程.由于 PCM 总量的减少,且远离热壁面侧的空穴对流动过程的阻碍作用较小,使得  $X$  值一直大于 0.而空穴靠近热壁面侧情况下,曲线处于  $X = 0$  的下方,这是因为空穴的低导热率对 PCM 内部传热的阻碍作用以及对流体流动的抑制效果,充当了绝热层,削弱了传热过程.而空穴集中在上、下半侧时,其作用于熔化的影响相对较小.

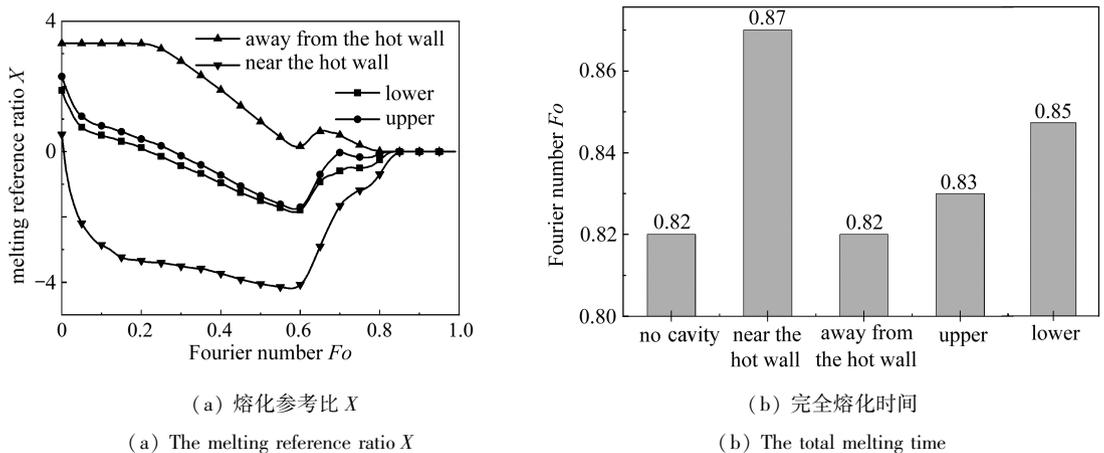


图 9 不同空穴分布位置下复合 PCM 的熔化参考比  $X$  和完全熔化时间

Fig. 9 The melting reference ratio  $X$  and total melting time with different cavity distribution locations

图 9(b)为不同空穴位置情况下复合 PCM 的完全熔化时间,无空穴时为  $Fo = 0.82$ ,当空穴存在时,都在

一定程度上延长了熔化时间,可以发现当空穴靠近热壁面侧时,对复合 PCM 熔化速率的延缓效果最强烈,使其完全熔化时间增加了 6.1%。当空穴远离热壁面侧时,它的阻碍作用最小。值得关注的是,当空穴位于上半侧时的复合 PCM 完全熔化时间小于其位于下半侧时的情况,这是因为在热浮升力的影响下,方腔上侧 PCM 的熔化速率快于下侧 PCM,且当空穴集中在下半侧时,这使得下半侧 PCM 的传热速度进一步减慢。

#### 4.3 不同泡沫金属导热系数比下复合 PCM 的热性能

泡沫金属与 PCM 之间的导热作用不仅决定了传热速率,同样也会影响空穴的耦合效应。图 10(a) 为不同  $k_s$  下复合 PCM 的熔化参考比曲线图 ( $\xi = 7.6\%$ ),随着  $k_s$  减小, $X$  曲线的波动范围越大,说明空穴效应越显著。当  $k_s = 250$  和  $500$  时, $X$  值一直大于 0,说明空穴效应在高导热系数比的情况下可以忽略,这得益于泡沫金属与 PCM 间的传热主导地位,削弱了空穴带来的抑制效果。

图 10(b) 对比了不同  $k_s$  情况下复合 PCM 的全熔时间。当  $k_s = 20$  时,有无空穴下的差异最为明显,无空穴时 PCM 的全熔时刻为  $Fo = 1.01$ ;而当存在空穴时,全熔时刻为  $Fo = 1.12$ ,无量纲熔化时间增加了 10.9%。随着  $k_s$  的进一步增加,空穴效应的影响逐渐减小,当  $k_s = 50$  时,有空穴情况下 PCM 的熔化时间比无空穴情况仅增加了 2.4%。然后,当  $k_s$  进一步增大到 100,250 和 500 时,存在空穴情况下的无量纲熔化时间均比无空穴情况下下降了 0.1。因此,可以合理推断当采用导热系数比大于 100 时,存在空穴的复合 PCM 的熔化时间小于无空穴情况,可有效缓解空穴带来的负面效应。

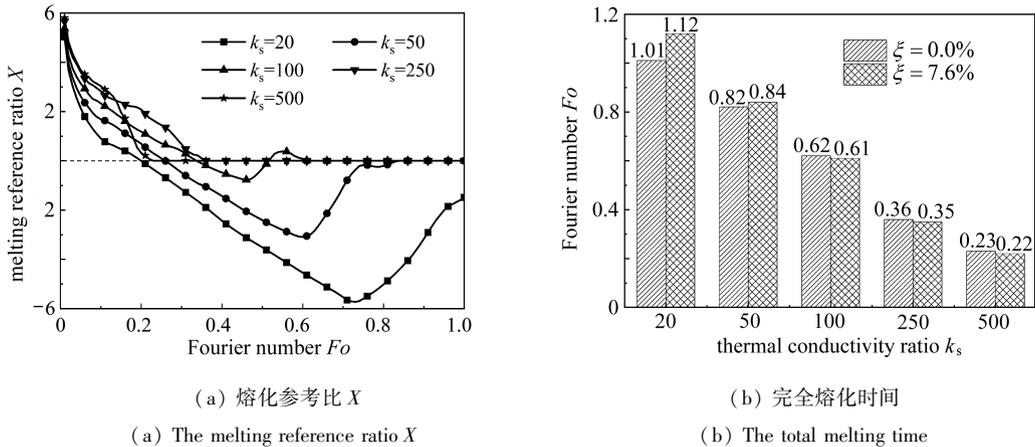


图 10 不同  $k_s$  下复合 PCM 的熔化参考比  $X$  和完全熔化时间

Fig. 10 The melting reference ratio  $X$  and total melting time of composite PCMs with different thermal conductivity ratios

## 5 结 论

本文建立了耦合空穴的泡沫金属复合 PCM 模型,基于焯法的三维 MRT-LBM 模拟了不同空穴体积分数  $\xi$ 、位置分布以及导热系数比  $k_s$  对复合 PCM 热性能的影响,对温度云图、熔化参考比和完全熔化时间等因素进行了数值分析,得出了以下结论:

1) 空穴主要通过增加传热热阻和阻碍流体流动两方面来抑制复合 PCM 的传热过程。空穴的存在不仅使 PCM 内部的等温线分布更加扭曲,同时降低 PCM 的潜热储热量。在 Fourier 数  $Fo = 0.7$  时刻下,当  $\xi = 2.4\%$ ,  $7.6\%$  和  $11.7\%$  时,相较于无空穴情况下的储热量分别减少了 3.2%, 9.0% 和 13.0%。

2) 当空穴靠近热壁面侧时,其对复合 PCM 熔化过程的抑制作用最为明显,这时的空穴类似于绝热层。而空穴位于热壁面侧较远时对复合 PCM 的熔化过程影响最小,因此在实际工程中,当空穴无法避免时,尽可能使空穴远离热壁面侧。

3) 相较于无空穴情况,当复合 PCM 中存在  $\xi = 7.6\%$  的空穴时,选用  $k_s = 20$  的泡沫金属时,其全熔时间增加了 10.9%。随着泡沫金属和 PCM 的导热比的进一步增大,空穴效应被弱化。为削弱空穴效应,可以选择导热系数比超过 100 的泡沫金属骨架来强化热传导。

## 参考文献(References):

- [1] LUO X, WANG J H, DOONER M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation[J]. *Applied Energy*, 2015, **137**: 511-536.
- [2] OPEYEMI B M. Path to sustainable energy consumption: the possibility of substituting renewable energy for non-renewable energy[J]. *Energy*, 2021, **228**: 120519.
- [3] SHAMBERGER P J, BRUNO N M. Review of metallic phase change materials for high heat flux transient thermal management applications[J]. *Applied Energy*, 2020, **258**: 113955.
- [4] XU H T, WANG N, ZHANG C Y, et al. Energy conversion performance of a PV/T-PCM system under different thermal regulation strategies[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, **229**: 113660.
- [5] MAHMOUD M, RAMADAM M, PULLEN K, et al. *Waste Heat Recovery Applications Incorporating Phase Change Materials*[M]//*Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier, 2021.
- [6] 黄钦, 余凌峰, 陈凯. 相变材料耦合冷板电池热管理系统的优化设计[J]. *应用数学和力学*, 2022, **43**(11): 1195-1202. (HUANG Qin, YU Lingfeng, CHEN Kai. Design of the battery thermal management system with phase change material coupled cold plates[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(11): 1195-1202. (in Chinese))
- [7] 潘艾刚, 王俊彪, 张贤杰. 相变温控技术在航天热控领域中的应用现状及展望[J]. *材料导报*, 2013, **27**(23): 113-119. (PAN Aigang, WANG Junbiao, ZHANG Xianjie. A review on development and applications of metal phase change technology in thermal control for aeronautics[J]. *Materials Reports*, 2013, **27**(23): 113-119. (in Chinese))
- [8] HEYHAT M M, MOUSAVI S, SIAVASHI M. Battery thermal management with thermal energy storage composites of PCM, metal foam, fin and nanoparticle[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, **28**: 101235.
- [9] AL-JETHELAH M, EBADI S, VENKATESHWAR K, et al. Charging nanoparticle enhanced bio-based PCM in open cell metallic foams: an experimental investigation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, **148**: 1029-1042.
- [10] HUANG X P, SUN C, CHEN Z Q, et al. Experimental and numerical studies on melting process of phase change materials (PCMs) embedded in open-cells metal foams[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, **170**: 107151.
- [11] YANG B, ZHANG R R, GAO Z, et al. Effect of nanoparticles and metal foams on heat transfer properties of PCMs[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, **179**: 107567.
- [12] 马预谱, 胡锦涛, 陈奇, 等. 金属材料增强的石蜡储热性能研究[J]. *工程热物理学报*, 2016, **37**(10): 2196-2201. (MA Yupu, HU Jinyan, CHEN Qi, et al. Study on heat storage performance enhancement of paraffin by metallic material[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, **37**(10): 2196-2201. (in Chinese))
- [13] CHEN L, WANG L, WANG Y F, et al. Influence of phase change material volume shrinkage on the cyclic process of thermal energy storage: a visualization study[J]. *Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics*, 2022, **203**: 117776.
- [14] 徐伟强, 袁修干, 邢玉明, 等. 空穴分布对固液相变蓄热过程的影响[J]. *太阳能学报*, 2011, **32**(2): 240-245. (XU Weiqiang, YUAN Xiugan, XING Yuming, et al. Effects of void distribution on solid-liquid phase change thermal storage[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2011, **32**(2): 240-245. (in Chinese))
- [15] CHIEW J, CHIN C S, TOH W D, et al. Low-temperature macro-encapsulated phase change material based thermal energy storage system without air void space design[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, **141**: 928-938.
- [16] JANGHEL D, SAHA S K, KARAGADDE S. Effect of shrinkage void on thermal performance of pure and binary phase change materials based thermal energy storage system: a semi-analytical approach[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, **167**: 114706.

- [17] SOLOMON L, ELMOZUGHY 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.
- [18] LI X Y, NIU C, LI X X, et al. Pore-scale investigation on effects of void cavity distribution on melting of composite phase change materials[J]. *Applied Energy*, 2020, **275**: 115302.
- [19] CHEN L, KANG Q J, MU Y T, et al. A critical review of the pseudopotential multiphase lattice Boltzmann model: methods and applications[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, **76**: 210-236.
- [20] SO R M C, LEUNG R C K, KAM E W S, et al. Progress in the development of a new lattice Boltzmann method [J]. *Computers & Fluids*, 2019, **190**: 440-469.
- [21] REN Q L, CHAN C. GPU accelerated numerical study of PCM melting process in an enclosure with internal fins using lattice Boltzmann method[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, **100**: 522-535.
- [22] HUANG R Z, WU H Y, CHENG P. A new lattice Boltzmann model for solid-liquid phase change[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, **59**: 295-301.
- [23] LI D, TONG Z X, REN Q L, et al. Three-dimensional lattice Boltzmann models for solid-liquid phase change [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017, **115**(Part B): 1334-1347.
- [24] YOSHIDA H, KOBAYASHI T, HAYASHI H, et al. Boundary condition at a two-phase interface in the lattice boltzmann method for the convection-diffusion equation[J]. *Physical Review E*, **90**(1): 013303.