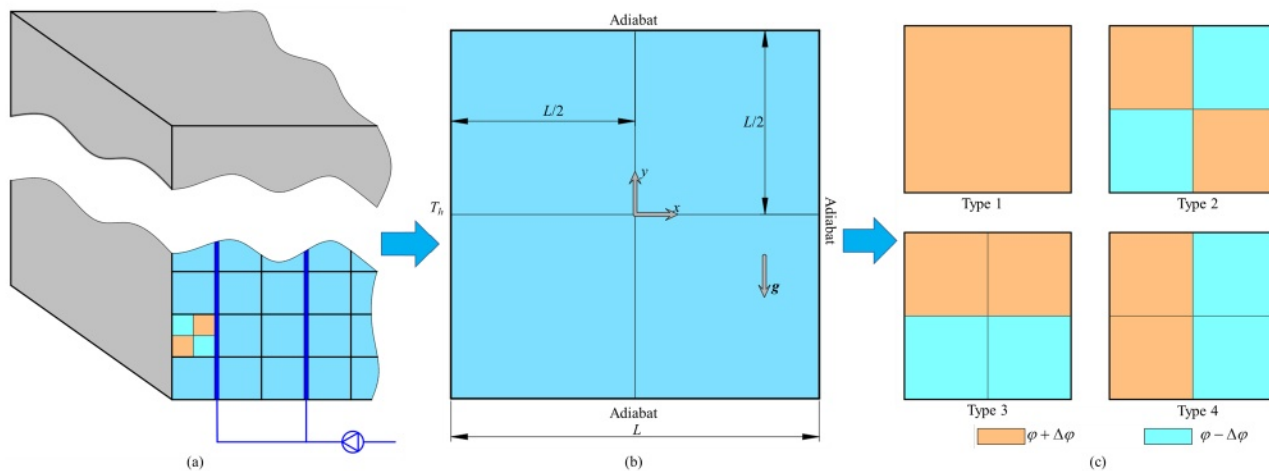


图形抽象

基于纳米颗粒分布优化的强化传热储热系统

尚碧晨, 张立伟, 李冰冰, 霍玉涛



突出了

基于纳米颗粒分布优化的强化传热储热系统

尚碧晨，张立伟，李冰冰，霍玉涛

- 热储能单元通过隔热隔离，通过导热流体通道进行加热。
- 本文中各种分布都有强化换热的作用，其中2型分布下的熔化速率更快，在瑞利数从 5×10^{-3} 到 10^{-6} 变化时，熔化速率比1型提高了2.13%、1.84%、1.9%、1.72%、1.8%、1.89%。
- 优化分布式储能中的纳米颗粒体积分数系统。

基于纳米颗粒分布优化增强传热的热能存储系统

毕晨Shang^a, 李伟Zhang^a, 冰冰Li^a, 禹涛Huo^a
中国矿业大学低碳能源与动力工程学院^aSchool, 江苏徐州221116

摘要。

纳米流体作为一种高效率、高换热性能的新型传热介质，可以有效地提高热系统的换热性能。本文采用晶格玻尔兹曼方法，提出了一种优化纳米颗粒分布的新型储热系统，该储热系统采用间隔层分隔的纳米增强PCM。储热单元通过隔热隔离，并通过导热流体通道进行加热。研究了瑞利数、体积分数和布置方式对性能的影响。结果表明:瑞利数越大，储热系统的反应越强烈;得出左上区域的强对流现象多于左下区域的强对流现象，可以降低左下区域的体积分数来增强这种换热的效率，从而达到更快的熔化速率。与1型相比，本文研究的各种分布都具有不同程度的加速熔化速率的作用。本研究表明，增加方形腔左上方相变材料的体积分数，与左下方相比，对熔化速率有促进作用，且两者的差异越大，效果越好。

关键词:热能储存，分离板，晶格玻尔兹曼，纳米增强PCM

1. 介绍

热能储存(TES)是提高太阳能、风能和太阳能等新能源利用率的重要技术之一

地热能[1]。此外，通过应用TES，还可以回收化工余热[2]。导热系数是TES最重要的评价指标，相变材料(Phase Change Material, PCM)的导热系数是重要的影响因素之一[3]。因此，为了提高TES的有效性，提出了几种增强方法。

人们普遍注意到，大多数PCM具有较低的导热系数，提高TES换热率的有效途径是增大导热系数，如在PCM中插入高导热系数的材料。Feng等人[4]利用泡沫铜来提高石蜡的传热率。他们研究了PCM散热器的有效保护时间，发现当泡沫铜填充比从0增加到40%时，石蜡的熔化率从20.3%增加到43.3%。Fan等人[5]提出使用碳泡沫能够提高光热转换能力，结果表明，使用碳泡沫，充放电效率接近90%。Chen等人[6]在TES中采用了泡沫镍。他们提出了鳍状泡沫结构，并对凝固过程进行了研究。此外，Du等人[7]也使用3D数值模型对翅片泡沫结构进行了研究。与纯PCM相比，翅片泡沫结构的完全熔化时间缩短了83.68%，温度均匀性提高了91.12%。He等[8]在PCM/泡沫铜中插入磁场增强自然对流。正磁场使PCM/泡沫铜的熔化率和储能率分别提高18.2%和23.1%。但在凝固过程中，磁场的作用较弱。Liao等[9]将相变材料封装成热能存储系统，并应用于太阳能的利用。利用纳入自然对流模型的模拟结果，提出了一种线性回归方法作为一种新的有效导热系数关联。Jinming等[10]研究表明，当碳纳米管的重量仅为5%时，聚氨酯-碳纳米管复合材料的导热系数提高了2.3倍，太阳能蓄热效率达到85.89%，这有助于后续进一步探索太阳能应用的复合pcm。

另一种提高TES热性能的有效方法是插入高导热鳍片，Oztop等[11]利用人工神经网络设计了应用于相变TES的鳍片结构。他们

他们发现鱼鳍可以显著增强传热。在h型TES系统中，Izadi等[12]研究了翅片角度对熔化过程的影响。他们发现传热增强是由翅片的导热传热引起的。Mostafavi和Jain[13]提出了基于翅片的基壁与PCM之间传热的理论分析，并将改进后的系统应用于热管理。基于翅片的散热器也被用于大功率电子设备的冷却[14]。此外，Liu等[15]在余热回收中提出了梯状翅片。对TES装置进行了数值测试，与原直翅壳相比，熔化时间缩短了52.2%。Guo等[16]证明在TES中使用非均匀角度翅片可使完全熔化时间缩短69.59%。Ding和Liu[17]对壳式换热器内穿孔翅片和狭缝翅片两种类型的翅片进行了数值研究。结果表明，换热性能的提高源于堵塞效应的减小。

现有的研究团队正在通过合成和改善共晶盐的热性能和稳定性来研究储热系统，以优化储热装置的结构。氯化物、氟化物和碳酸盐是有潜力的储热介质，可作为高温储热系统中的潜在储热介质使用[18]。研究人员已经确定并计算了这三种共晶盐的熔点、导热系数、潜热等参数[19,20]，为聚光太阳能电站的蓄热材料提供了重要的指导。并通过CuO增强传热[21]。

值得注意的是，传统的传热介质如水、乙二醇、导热油等，但导热系数较低。自20世纪90年代以来，随着纳米技术的发展，研究人员开始探索纳米材料技术在强化传热领域的应用，并研究新一代高效传热和冷却技术。1995年，美国阿拉贡国家实验室的s.s. Choi教授首次提出了“纳米流体”的概念[22]，纳米技术与传统热工程领域的创新结合具有非常广阔的应用前景和潜在的重大经济价值。纳米技术与热工作为传统领域的创新结合，具有非常广阔的应用前景和潜在显著的经济价值。作为一种高效率、高传热性能的新型传热介质，

纳米流体可以有效提高热系统的换热性能，提高热系统的高效、低阻致密等性能指标。在过去的二十年中，晶格玻尔兹曼方法(Lattice Boltzmann Method, LBM)成为求解流体力学和传热问题的一种有效而有力的方法。LBM可用于模拟微观和纳米尺度的流动，非常适合并行计算或GPU加速[23]。

从现有的文献来看，以往的研究并没有考虑带布置的间隔片对NEPCM的分离效果。本文提出了一种新的储热系统，用于优化纳米颗粒的分布。利用LBM研究了瑞利数、体积分数和布置方式对复合材料的影响。研究结果对TES系统的设计具有一定的指导意义。

2. 模型描述

2.1. Physical模型

TES罐示意图如图1 (a)所示。每个TES单元由保温材料隔开，在泵的驱动下，由带换热流体的通道加热。在储能过程中，传热流体所携带的热量被传递给PCM。为方便起见，研究了TES单元之一($L \times L$)，如图1 (b)所示。研究了NEPCM布置的影响，示意图如图1 (c)所示。考虑了四种布置。在类型2-4中，每个由单独板划分的部分都填充NEPCM。在每种类型中，区域按从左到右，从上到下的顺序命名为“0”或“1”。例如，类型2尊重“0101”的分布。

NEPCM的热性能与纳米颗粒的体积分数有关。本文采用 Al_2O_3 纳米颗粒，体积分数为 ϕ 。为保证机组总潜热，将带+和-的NEPCM分别填入“1”和“0”部分。

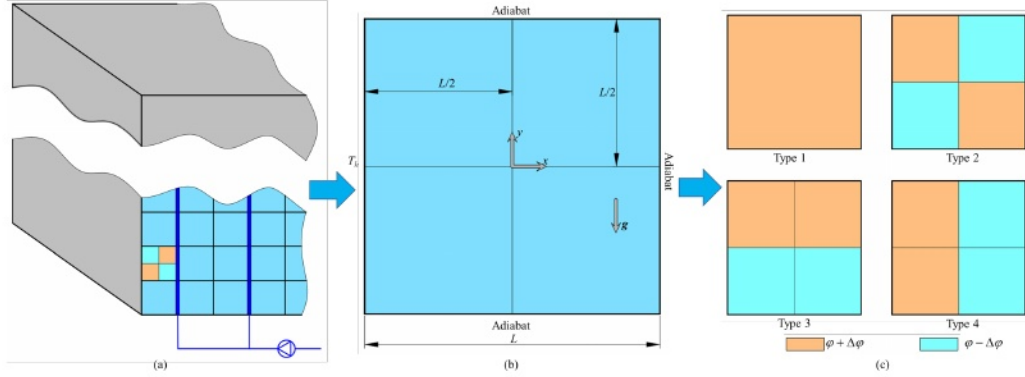


图1所示。(a)储热罐示意图, (b)储热单元示意图, (c) NEPCM布置示意图

2.2. 边界条件

通道简化为恒温边界 T_h 。其他边界设为绝热边界。在 $x = L/2$ 和 $y = L/2$ 处放置两个独立的板。分离板的厚度接近0, 分离板的材料也为NEPCM。NEPCM为固体, 初始温度为 T_0 。

2.3. 数值模型和控制方程

本研究假设NEPCM为牛顿流体, 流体不可压缩。应用焓变LBM来揭示流动和传热行为。密度分布函数和焓分布函数的演化方程如下[24,25]:

$$f_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(x, t) - \frac{1}{\tau_f} [f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)] + \Delta t F_i \quad (1)$$

$$g_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) = g_i(x, t) - \frac{1}{\tau_g} [g_i(x, t) - g_i^{eq}(x, t)] \quad (2)$$

其中 f_i 和 g_i 为 i 方向的密度和焓分布函数, f_i^{eq} 和 g_i^{eq} 为平衡分布函数, 如下[26]:

$$f_i^{eq} = \omega_i \rho_{bulk} \left[1 + \frac{e_i \cdot u}{c_s^2} + \frac{(e_i \cdot u)^2}{2c_s^4} - \frac{u^2}{2c_s^2} \right] \quad (3)$$

$$g_i^{eq} = \omega_i \left[H + C_{p,bulk} T \left(\frac{e_i \cdot u}{c_s^2} + \frac{(e_i \cdot u)^2}{2c_s^4} - \frac{u^2}{2c_s^2} \right) \right] + \varpi_i (C_{p,bulk} T - H) \quad (4)$$

其中 ω_i 和 e_i 为 i 方向上的加权系数和离散速度， c_s 为点阵声速。本文采用D2Q9碰撞模型，如下：

$$\omega_i = \begin{cases} \frac{4}{9} & i = 0 \\ \frac{1}{9} & i = 1 \sim 4 \\ \frac{1}{36} & i = 5 \sim 8 \end{cases} \quad (5)$$

$$e_i = \begin{cases} (0, 0) & i = 0 \\ c \left(\cos \left[\frac{\pi}{2} (i - 1) \right], \sin \left[\frac{\pi}{2} (i - 1) \right] \right) & i = 1, 2, 3, 4 \\ \sqrt{2}c \left(\cos \left[\frac{\pi}{4} (2i - 1) \right], \sin \left[\frac{\pi}{4} (2i - 1) \right] \right) & i = 5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (6)$$

式中， $c = \Delta x / \Delta t$ 为点阵速度。Eq.(4)中的 ϖ_i 为额外权重系数，如下：

$$\varpi_i = \begin{cases} -\sum_{i=1}^8 \omega_i & i = 0 \\ \omega_i & i \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

在Eq.(1)中，右侧的 F_i 为 i 方向上的离散体力项，可得：

$$F_i = \omega_i \left(1 - \frac{1}{2\tau_f} \right) \left(\frac{e_i \cdot u}{c_s^2} + \frac{e_i \cdot u}{c_s^4} e_i \right) \cdot \rho f_m \quad (8)$$

其中 f_m 为体力，本文中的浮力，计算公式为：

$$f_m = g\beta_{bulk} (T - T_0) \quad (9)$$

式中 g 和 β 分别为重力加速度(如图1所示)和热膨胀加速度。

式(1)中的 τ_f 和 τ_f 为无因次松弛时间，由：

$$\nu_{bulk} = \frac{\mu_{bulk}}{\rho_{bulk}} = \left(\tau_f - \frac{1}{2} \right) \Delta t c_s^2 \quad (10)$$

$$\alpha_{bulk} = \frac{\lambda_{bulk}}{\rho_{bulk} C_{p,bulk}} = \left(\tau_g - \frac{1}{2} \right) \Delta t c_s^2 \quad (11)$$

其中 ν 和 α 为粘度和热扩散系数。求解Eq.(1)和(2)后, 由分布函数可以计算出密度、速度和焓, 如下:

$$\rho = \sum_i f_i \quad (12)$$

$$\rho u = \sum_i e_i f_i + \frac{\Delta t}{2} \rho f_m \quad (13)$$

$$H = \sum_i g_i \quad (14)$$

本文将瑞利数(Ra)、普朗特数(Pr)和斯蒂芬数(Ste)定义如下:

$$Ra = \frac{g \beta_{PCM} (T_h - T_0) L^3}{\nu_{PCM} \alpha_{PCM}} \quad (15)$$

$$Pr = \frac{\nu_{PCM}}{\alpha_{PCM}} \quad (16)$$

$$Ste = \frac{C_{p,PCM} (T_h - T_0)}{h_{sl}} \quad (17)$$

其中下标PCM表示纯PCM, 而上式中的下标bulk表示NEPCM。此外, 根据体积分数计算NEPCM的热性能如下[27,28,29]:

$$\rho_{bulk} = (1 - \varphi) \rho_{PCM} + \varphi \rho_{nano} \quad (18)$$

$$(\rho C_p)_{bulk} = (1 - \varphi) (\rho C_p)_{PCM} + \varphi (\rho C_p)_{nano} \quad (19)$$

$$\lambda_{bulk} = \frac{\lambda_{nano} + 2\lambda_{PCM} + 2(\lambda_{nano} - \lambda_{PCM})\varphi}{\lambda_{nano} + 2\lambda_{PCM} - 2(\lambda_{nano} - \lambda_{PCM})\varphi} \lambda_{PCM} \quad (20)$$

$$\mu_{bulk} = 0.983 \mu_{PCM} \exp(12.959\varphi) \quad (21)$$

$$(\rho \beta)_{bulk} = (1 - \varphi) (\rho \beta)_{PCM} \quad (22)$$

$$(\rho h_{sl})_{bulk} = (1 - \varphi) (\rho h_{sl})_{PCM} \quad (23)$$

“纳米颗粒”和“PCM”的热性能如表1所示。根据材料的热性能，普朗特数保持为 $Pr = 7.0$ 。

表1. 纳米颗粒和PCM的热性能

	$\rho(\text{kgm}^{-3})$	$C_p(\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1})$	$\lambda(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$	$\mu(\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1})$	$h_{sl}(\text{Jkg}^{-1})$
Nanoparticle	3880	765	25	-	-
PCM	930	1600	0.21	9.2×10^{-4}	195000

2.4. 模型验证

对本研究进行网格独立性分析。图2中的红色虚线表示网格大小为 400×400 时平均努塞尔数的变化情况，误差在3%以内。可以看出， 100×100 和 200×200 的网格大小都在这个范围内。考虑到模拟的准确性和计算资源使用的合理化，选择 100×100 的网格大小进行计算。

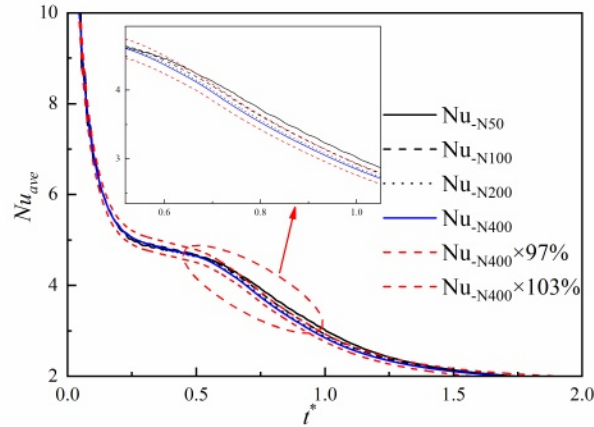


图2所示。网格独立性验证

我们应用LBM求解一维纯导热问题，并将模拟结果与解析解进行了比较，如图图3所示。当 $t^*=4$ 、 $t^*=10$ 、 $t^*=20$ 时，两种方法得到的结果误差分别为1.9%、1.3%和1%。另外，我们通过比较我们的模型验证了自然对流问题

门格尔的研究[30]。图3给出了平均努塞尔数和液体分数数据，结果吻合良好。与门格尔的工作相比，我们提出的LBM的误差小于2%，证明了它的高可靠性。

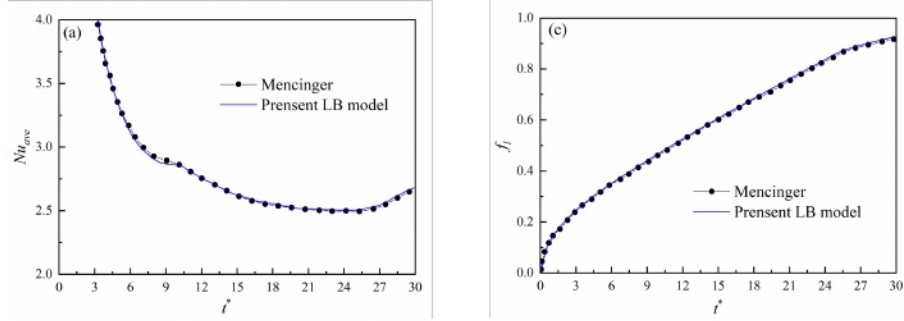


图3所示。(a)平均努塞尔数和(b)总液体分数随时间的变化

$$Ra=2.5 \times 10^{-4}$$

3. 结果与讨论

3.1. 瑞利数的影响

瑞利数是影响TES中PCM熔化速度的重要因素。本小节研究了不同分布结构下瑞利数对NEPCM熔化模式的影响，其物理性质见表，如图1(c)所示。在这一小节中，应用 Al_2O_3 纳米颗粒，体积分数为 ϕ 。斯蒂芬的号码设置为0.1。瑞利数从 10^{-3} 到 10^{-6} 不等。如上所述，通道被视为 T_h 的温度边界，其他边界是绝热的。在初始阶段，NEPCM为固体，温度保持 T_0 。结构分为四个部分。分别在 $x = L/2$ 和 $y = L/2$ 处放置两块独立板。分离板的厚度接近0，分离板的材料也为NEPCM。此外，还使用 100×100 的网格系统对所提出的数值模型进行了评估。本节中使用的每种类型的区域浓度如表2所示。

表2。按类型和地区分的浓度

	Upper left concentration	Upper right concentration	Bottom left concentration	Bottom right concentration
Type1	0.04	0.04	0.04	0.04
Type2	0.03	0.05	0.05	0.03
Type3	0.03	0.05	0.03	0.05
Type4	0.03	0.03	0.05	0.05

无量纲参数计算如下:

$$T^* = \frac{T - T_m}{T_m - T_0} \quad (24)$$

$$t^* = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (25)$$

这里 T^* , t^* stand为无因次温度, 无因次时间。 T_m 为相变温度, L 为特征长度。平均无量纲温度的计算公式为:

$$T_{ave}^* = \frac{\sum_n T^*}{n} \quad (26)$$

温度标准差计算公式为:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_n (T^* - T_{ave}^*)^2}{n}} \quad (27)$$

图4显示了1型 = 5×10^{-4} , $t^*0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0, 3.3$ 的温度分布。由于浮力的作用, 在被加热的左壁面附近, PCM被加热并从方形腔体底部流向顶部区域。在固液相变界面处, 热量传递到固体PCM并流向方形腔体底部, 形成顺时针方向的自然对流流动。在 $t^*=0.6$ 处, 左上方和左下方区域的顶部出现上部快速熔化和下部缓慢熔化的现象。上部流体受热后向右侧移动, 因此在顶部看起来有一个快速的熔化速率。在 $t^*=2.4$ 处, 由于温度聚集, 出现了与左侧相似的温度分布。当上部PCM完全

融化后，它逐渐缓慢地向右下角融化，直到完全液化。

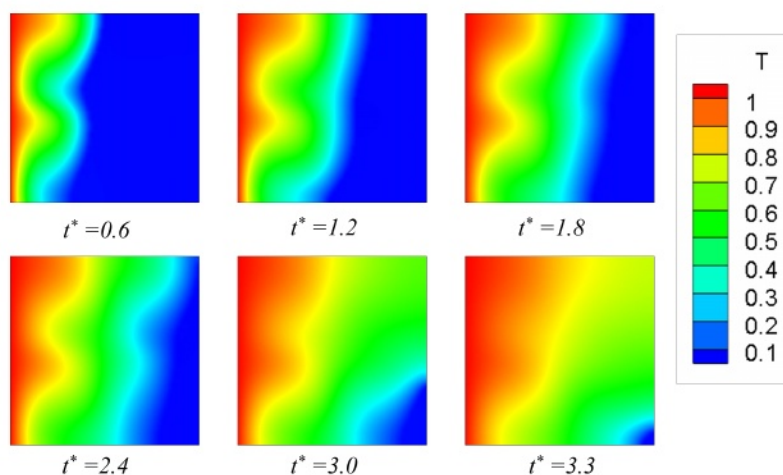


图4所示。1型云在不同温度下的温度分布

图5以图形的方式描绘了三种分布下模型内部温度-温度的标准差的变化趋势，很明显存在一个极大的值。也就是说，温度大都市的标准差呈现出急剧上升和快速下降两个阶段。在左壁向内部传热的过程中，内部PCM以显热的形式吸收热量，导致局部温度升高。初始阶段，内部纳米流体的温度保持在 T_0 。当内部温度达到相变温度时，方形腔内的PCM吸收热量，由固相转变为液相。当靠近左壁的PCM部分熔化时，剩余的PCM主要以感热的形式吸收热量，液体分数上升速度较慢。当远离左壁部分的温度仍保持在初始温度时，温度的标准差急剧上升。当内部PCM达到相变温度时，PCM开始以潜热的形式吸收大量的热量。由于相变过程的温度保持在相变温度附近，因此温度的标准差开始减小。在低瑞利数情况下，传热的主要方式是导热，而在高瑞利数情况下，传热的主要方式是导热

换热的主要方式是热对流，这使得低瑞利数平均温度的上升速度比高瑞利数低，高瑞利数温度的标准差在较短的时间内上升，达到相变温度时，低瑞利数的下降速度比高瑞利数的下降速度慢。

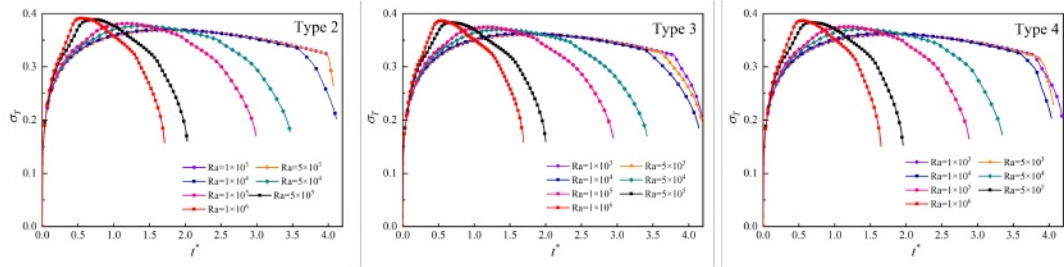


图5所示。t*处的温度标准差

平均努塞尔数计算公式为:

$$Nu_{ave} = - \int_0^1 \left(\frac{\partial T^*}{\partial x^*} \right)_{x^*=0} dy^* \quad (28)$$

平均努塞尔数的大小反映了流体传热的强度。这对于理解和优化传热过程至关重要。作为评价系统对流导热率的重要指标，本节分析不同瑞利数下的左壁面平均努塞尔数随时间的变化是至关重要的。瑞利数取值范围为 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 。从图6可以看出，在瑞利数较小的情况下，导热系数所占比例较大，平均努塞尔数上升的速度不是很快。在高瑞利数的情况下，对流比热传导更重要，因此平均努塞尔数上升很快。随着熔融的进行，温度的标准差逐渐减小，对流换热逐渐减小。平均努塞尔数逐渐减小，瑞利数越大，减小速度越快。

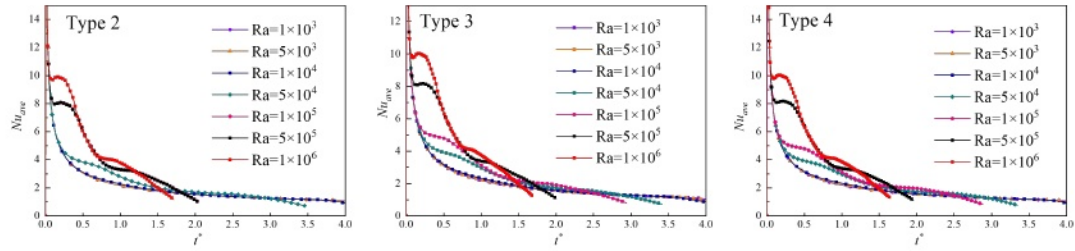


图6所示。t*处的平均努塞尔数

3.2. 排列的影响

在本小节中， Al_2O_3 纳米颗粒在不同排列场景之间的熔化，通过监测每个区域的 ϕ 参数，分别研究了 Al_2O_3 纳米颗粒在每个排列场景中每个区域的熔化。瑞利数设置为 10^{-4} 。参数的其他设置以及区域的划分和命名方式与3.1相同。本节使用的每种类型的区域浓度如表3所示。

表3。按类型和地区添加的浓度

	Upper left concentration	Upper right concentration	Bottom left concentration	Bottom right concentration
Type5	0.05	0.03	0.03	0.05
Type6	0.05	0.03	0.05	0.03
Type7	0.05	0.05	0.03	0.03

3.2.1. 布局之间安排的影响

本小节主要关注类型1-4。图7为瑞利数= 10^{-4} 时各部分液体分数随无因次时间的变化情况。图8显示了2-4型在 $t^*=1.0$ 、2.0、3.0和4.0时的温度计数器。

结合计数器可以分析，三种分布下的左上角区域融化最快，在 $t^*=$ 处达到 $\phi = 1$

分别在0.9714、0.9714和0.93616处，其次是左下区域，在 $t^*=1.21317$ 、1.09475和

1.27317。在左侧两个区域熔化的过程中，右侧两个区域的纳米颗粒几乎没有熔化。右两个区域的熔化倾向只有在左两个区域几乎完全熔化时才会发生。的

右上区域分别在无量纲时间达到液体分数= 1，右下区域在无量纲时间达到液体分数= 1。在液体热膨胀的作用下，受热的流体会受到浮力而向上流动，形成顺时针方向的自然对流，出现上部快融，下部慢融的现象。图中黄色曲线代表了四个区域内平均液体分数的变化，很明显可以看到，右边的两个区域是影响熔化速率的主要因素。

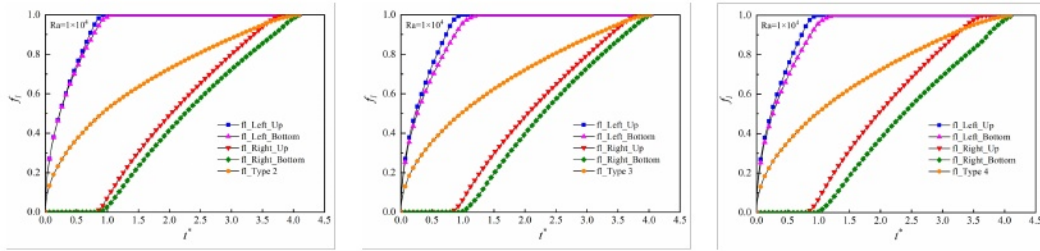


图7所示。t* between 布局下fl的变化

研究了不同布局下 Al_2O_3 纳米颗粒在各区域的熔化随无量纲时间的变化规律。

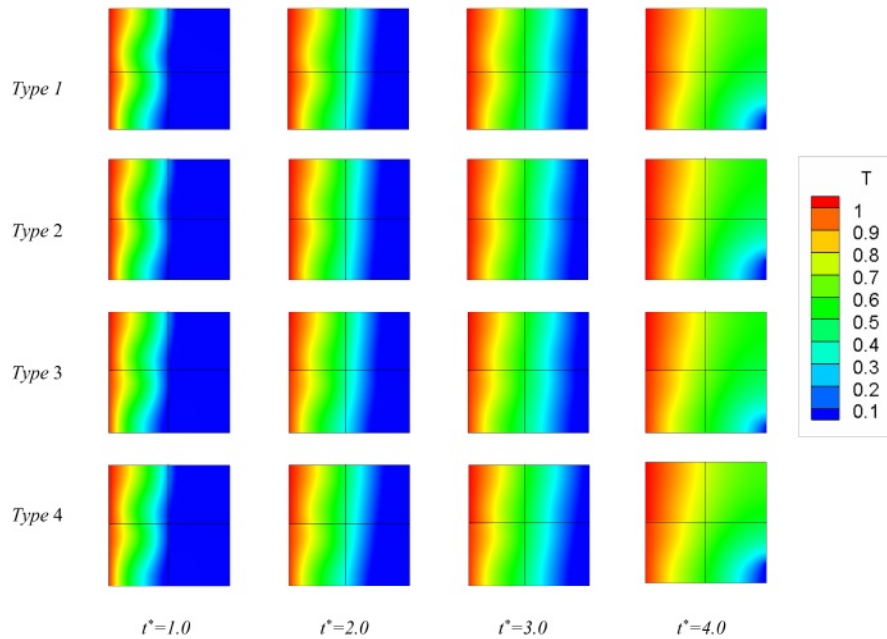


图8所示。类型2-4的云图在 t^* 处的分布

3.2.2. 布局内排列的影响

本小节重点介绍类型1-7。图9显示了瑞利数等于10的各种情况下， η 随无量纲时间的变化^[4]。图10显示了5-7型在 $t^*=1.0$ 、2.0、3.0和4.0时的温度云图。

结合云计数器可以分析出，在左上角区域，类型2-4的液体分数的增加速率大于对照组。因为在左上角区域对流换热更明显，所以它的融化速度更快。5-7型均有较低的液体分数的增长速度比对照，因为它们的纳米颗粒体积分数较大，所以它们的融化速度较慢。在左下方区域，2型、6型和7型的液体分数的增加速率都大于对照组。因为它的导热和传热能力更明显，所以它的融化速度更快。在右上方区域，4型、5型和6型的液体分数增加速率大于对照组。由于它们的纳米颗粒体积分数更小，所以它们的融化速度更快。在右下方区域，2型、3型和7型的液体分数增加速率均大于对照组。

由于受到更强的上层对流和左传导传热，其熔化速度更快。

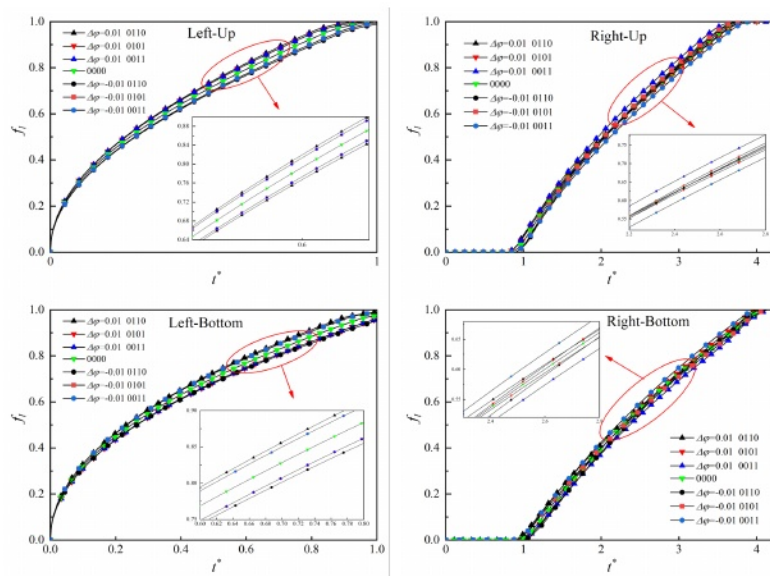


图9所示。布局内 t^* 的 f_l 变化

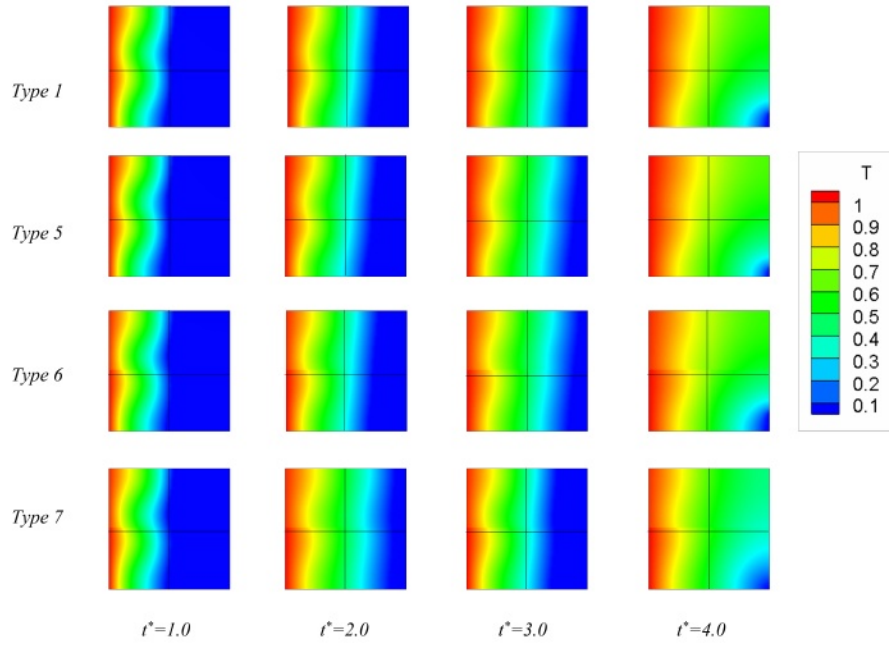


图10所示。布局内 t^* 的 θ 变化

用于研究确定方形腔区上下、左右部分的熔化情况。对左、右、上、下部分的液体馏分进行了分析。

左右两部分的比例计算公式为:

$$K_1 = \frac{fl_{Right-Up} + fl_{Right-Bottom}}{fl_{Left-Up} + fl_{Left-Bottom}} \quad (29)$$

上下部分的比例计算公式为:

$$K_2 = \frac{fl_{Right-Bottom} + fl_{Left-Bottom}}{fl_{Right-Up} + fl_{Left-Up}} \quad (30)$$

由图11可以看出, K_1 呈增大趋势, K_2 呈先减小后增大趋势, K_1 呈增大趋势, 这是由于左壁的加热使得左PCM的熔化速度相对较快;在对流作用下, 右侧PCM缓慢融化至全部融化, K_1 达到1。 K_2 呈现先减小后增大的趋势是因为开始时右侧两部分的液分数为0, 左侧两部分的液分数为0

的影响是热导率保持几乎相同的熔化速率;由于对流换热进行, 到达的热量聚集在左侧上部, 上部的热量比坐下的部分积累的热量快, 使熔化速度加快, K_2 呈下降趋势;在 $t^*=0.80399$ 、 0.8084 、 0.8084 、 0.84805 、 0.89431 、 0.8899 、 0.8899 、 0.8899 以后的类型中, 右上角比右下角先熔化的趋势和 η 较大导致 K_2 下降的趋势减小, 随着 $t^*=0.8062$ 、 0.9692 、 1.23352 、 1.38551 、 1.36349 、 3.4803 、 1.26877 熔化的继续, K_2 开始缓慢上升, 直至达到1。 $\Delta\phi=-0.01$ 在开始的类型3和4下, K_2 大于1, 因为阀座的下部比左上角导热性更强。

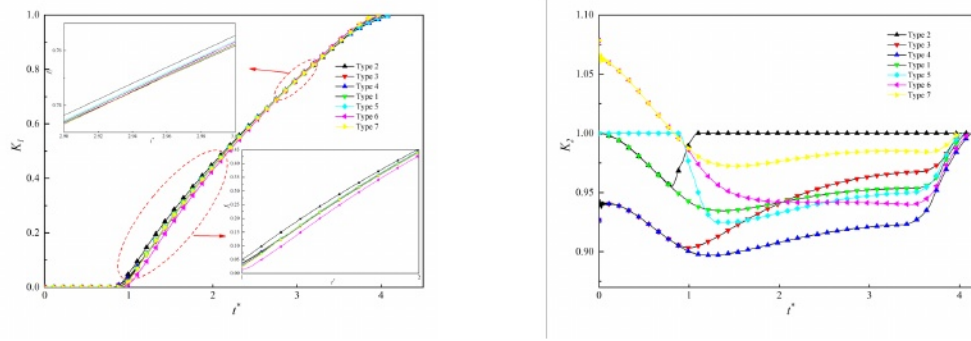


图11所示。 t^* 时左至右和上至下 q 的比值

3.3. 体积分数的影响

在本节中, 使用图1(c)所示的模型研究了具有相同体积分但结构各部分不同体积分数的纳米颗粒的熔化特性。在本节中, 使用了具有相同体积分数的纳米颗粒的模型。 $\phi=0.04$ 。分别研究了 $\Delta\phi=\pm 0.01$ 和 $\Delta\phi=\pm 0.02$ 四种情况下的熔化结果。以各部分体积分数为0.04的结构作为对照组。

本节增加了新的类型, 如表4所示。

表4。添加的不同体积分数类型

	Upper left concentration	Upper right concentration	Bottom left concentration	Bottom right concentration
Type8	0.02	0.06	0.06	0.02
Type9	0.02	0.06	0.02	0.06
Type10	0.02	0.02	0.06	0.06
Type11	0.06	0.02	0.02	0.06
Type12	0.06	0.02	0.06	0.02
Type13	0.06	0.06	0.02	0.02

相对完全熔化时间计算公式为:

$$\Phi = \frac{t^* - t_0^*}{t_0^*} \quad (31)$$

Φ represents 当前结构相对于所有部件体积分数为0.04的结构实现完全熔化所需时间的相对量级。根据Eq. 31分析了差异的相对大小。负值意味着该结构比对照组在更短的时间内融化。负值越小意味着它融化得越快，正值意味着熔化时间大于对照组。

$\phi - \Delta\phi$ 的部分用数字0表示， $\phi + \Delta\phi$ 的部分用数字1表示，即本节中 $\Delta\phi = 0.01$ 。由于物种的多样性，这里用数字的组合来表示不同的分布。图12示出了8-10型和11-13型在不同瑞利数下的相对完全熔化时间范围。当 $\Delta\phi = 0.02$ 时，除 Φ when 瑞利数为 10^{-3} 外，由于弱对流，9型分布均大于0。当瑞利数增加时，对流增强，导致熔化速率增加。0101分布和0110分布的相对完全熔化时间均大于0。当瑞利数小于 10^{-4} 时，9型分布比8型分布的熔化速度慢，当瑞利数大于 10^{-4} 时，8型分布比9型分布的熔化速度慢。当瑞利数大于 10^{-4} 时，9型的分布可能比10型慢。当 $\Delta\phi = -0.02$ 时，由于弱对流，11型在瑞利数处的分布为

10^{-3} , Φ is大于0, 表明熔融时间相对较长。随着瑞利数的增加, 对流增强, 导致融化速度的增加。11型在各 Φ less比0处的分布表明融化速度更快。随着瑞利数的增加, 相对完全融化时间缩短。12型分布的相对完全融化时间均大于0。

在瑞利数为 5×10^{-3} 、 10^{-4} 、 5×10^{-4} 、 10^{-5} 、 5×10^{-5} 、 10^{-6} 时, 9型分布的融化速率比1型分别提高了2.13%、1.84%、1.9%、1.72%、1.8%、1.89%。在瑞利数在 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 范围内变化时, 11型分布的融化速率比1型更快, 分别提高了0.304%、3.03%、1.69%、1.53%、1.78%、2.01%。当瑞利数在 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 范围内变化时, 13型分布的融化速率比1型分别提高了0.172%、0.531%、1.57%、4.64%、4.64%、4.32%、4.27%;

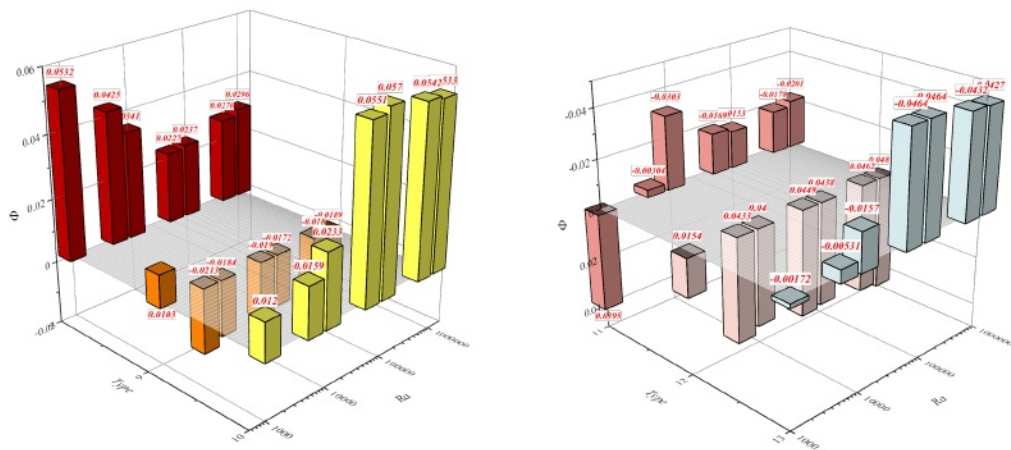


图12所示。相对融化时间随瑞利数的变化

进一步来说, 左上和左下区域的液体分数率先发生变化, 从上一节分析得出的结论来看, 左上区域的对流要比左下区域强, 因此可以降低左下区域的体积分数, 按照10型和12型进行分布, 这样可以更快地将热量传递到右侧。

根据图12得出的结论, 对比分析相同结构下不同体积分数的融化速率。分析

图13的分析得出结论，在相同的结构下，加强已知热交换强烈部分的体积分数可以加快熔化速度，获得更高的热交换效率。因此，比较几种可以强化的换热类型。在瑞利数小于 5×10^{-3} 之前，2型分布在相对完全熔化时间上比8型长。在瑞利数 $= 5 \times 10^{-3}$ 时，6型分布相对完全熔化时间短于11型分布。出于同样的原因，7型的分布在相对完全熔化时间上也短于13型。但是，它们都比对照组短，因为它们的值都小于零。其余情况下，在相对完全融化时间上， $\Delta \phi = 0.02$ 的分布都短于 $\Delta \phi = 0.01$ 。总体而言， $\Delta \phi = 0.02$ 情况下的完全熔化时间小于 $\Delta \phi = 0.01$ 情况下的完全熔化时间，这可以通过提高战士的体积分数来实现。

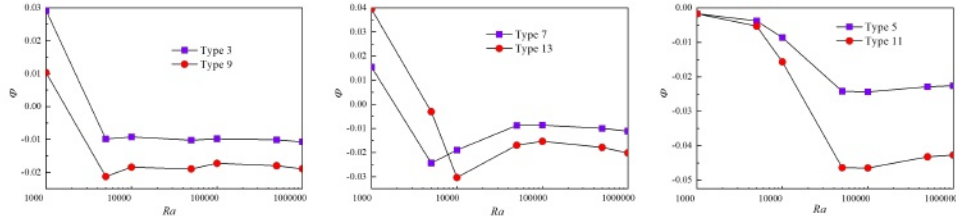


图13所示。相对熔化时间随瑞利数的变化

4. 结论

本文提出了一种具有优化NEPCM的新型TES。利用LBM研究了瑞利数、布置方式和体积分数对储热系统的影响。这些分析可以有效地分析储热系统内部的流动和传热，从而合理地排列其他空腔中的纳米颗粒。同时，研究结果表明，用间隔片对NEPCM进行隔离，合理的间隔片布置有利于提高储能系统的热效率，且瑞利数越大，储能系统的响应越剧烈。在瑞利数从 5×10^{-3} 到 10^{-6} 变化时，型2下分布的熔化速率较快，分别比型2增加了2.13%、1.84%、1.9%、1.72%、1.8%、1.89%

1,分别。在瑞利数从 5×10^{-3} 到 10^{-6} 变化时, 4型分布下的熔化速率比1型更快, 分别增加了0.304%、3.03%、1.69%、1.53%、1.78%、2.01%。与类型1相比, 类型6下的分布具有更快的熔化速率, 在瑞利数小于 10^{-3} 处分别增强了0.172%, 0.531%, 1.57%, 4.64%, 4.64%, 4.32%, 4.27%。综合分析左上角区域对流现象比左下角强, 右上方和下方区域的体积分数对熔化速率的影响不大, 因此可以通过增加左上角的体积分数和降低左下角的体积分数来提高这种传热效率。并根据本研究结果对工业生产产生有效的指导作用。但是, 本研究结果是建立在垫片材料与NEPCM相一致的基础上的, 需要在一定的特殊条件下进行, 在今后的研究过程中, 考虑不同类型的PCM和更多的排列对换热率的影响也是很有意义的。

5. 确认

本文得到中国自然科学基金(no . 5266120)资助。

6. 命名及缩略语

本文所涉及变量的缩写形式和完全限定形式如表5和表6所示。

表5所示。Nomenclature的个别参数

Nomenclature	
c	lattice speed [$m \cdot s^{-1}$]
c_s	lattice sound speed [$m \cdot s^{-1}$]
C_p	specific heat at constant pressure [$KJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
e_i	discrete velocity in direction i [$m \cdot s^{-1}$]
F_i	force [N]
f_i	distribution function for density in direction i [$kg \cdot m^{-3}$]
f_i^{eq}	equilibrium distribution function for density in direction i [$kg \cdot m^{-3}$]
f_l	volume fraction of liquid
f_m	buoyancy force [N]
\mathbf{g}	acceleration due to gravity [$m \cdot s^{-2}$]
g_i	distribution function for enthalpy in direction i [$J \cdot kg^{-1}$]
g_i^{eq}	equilibrium distribution function for enthalpy in direction i [$J \cdot kg^{-1}$]
H	the constant height of the fin [m]
h	total enthalpy [$J \cdot kg^{-1}$]
λ	thermal conductivity [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
L	total length of the heat boundary [m]
L_s	length of shell cross-section [m]
p	pressure [Pa]
Q	total heat absorption [W]
t	time [s]
t^*	dimensionless time
T	temperature [K]
T_0	Initial temperature [K]
T_h	hot temperature [K]
T^*	dimensionless temperature
u	velocity [$m \cdot s^{-1}$]
x, y	coordinates [m]
x^*, y^*	dimensionless coordinates
Greek symbols	
α	thermal diffusivity [$m^2 \cdot s^{-1}$]
β	thermal expansion coefficient $1 \cdot K^{-1}$
μ	dynamic viscosity [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]
ν	kinetic viscosity [$m^2 \cdot s^{-1}$]
ω_i	weight coefficient in direction i
ϖ_i	additional weight coefficient in direction i
ρ	density [$kg \cdot m^{-3}$]
τ_f	dimensionless relaxation time for density distribution function
τ_a	dimensionless relaxation time for enthalpy distribution function

表6所示。下标和缩写

Subscript	
PCM	Pure PCM
bulk	NEPCM
Abbreviation	
PCM	Phase Change Materials
bulk	Nanoparticles enhanced phase change materials
LBM	Lattice Boltzmann Method
TES	Thermal Energy Storage
Ra	Rayleigh number
Ste	Stefan number
Pr	Prandtl Number

参考文献。

- [1] Tong Xiao, Long Geng, Yucheng Dai, Jiateng Zhao, and Changhui Liu. Uv-cured polymer aided phase change thermal energy storage: Prepara-tion, mechanism and prospects. *Journal of Energy Storage*, 64:107066, 2023.
- [2] Sheng Yang, Xue-Feng Shao, Jia-Hao Luo, Seyedmohsen Baghaei Os-kouei, zgr Bayer, and Li-Wu Fan. A novel cascade latent heat ther-mal energy storage system consisting of erythritol and paraffin wax for deep recovery of medium-temperature industrial waste heat. *Energy*, 265:126359, 2023.
- [3] Cristina Prieto and Luisa F. Cabeza. Thermal energy storage (tes) with phase change materials (pcm) in solar power plants (csp). concept and plant performance. *Applied Energy*, 2019.
- [4] Wen-Chuang Feng, Bin Ding, Yuan Zhang, Ming-Fei Mu, and Liang Gong. How can copper foam better promote the melting process of phase change materials. *International Journal of Thermal Sciences*, 187:108199, 2023.
- [5] Ruijin Fan, Nianben Zheng, and Zhiqiang Sun. Enhanced photother-mal conversion capability of melamine foam-derived carbon foam-based form-stable phase change composites. *Energy Conversion and Manage-ment*, 263:115693, 2022.

- [6] Chuanqi Chen, Yanhua Diao, Yaohua Zhao, Tingting Zhu, Zhen Wang, Yifa Han, and Yutong Liu. Performance prediction of a finmetal foam-cold thermal energy storage device: Solidification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 202:123672, 2023.
- [7] Zhao Du, Gang Liu, Xinyu Huang, Tian Xiao, Xiaohu Yang, and Ya-Ling He. Numerical studies on a fin-foam composite structure towards improving melting phase change. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 208:124076, 2023.
- [8] Wenxuan He, Xianqing Liu, Rongfang Qiu, Yijie Zhuang, Changhong Wang, and Zhuoming Li. A comprehensive approach combining gradient porous metal foam and the magnetic field to regulate latent heat storage performance. *Applied Thermal Engineering*, 227: 120380, 2023.
- [9] Zhirong Liao, Chao Xu, Yunxiu Ren, Feng Gao, Xing Ju, and Xiaoze Du. A novel effective thermal conductivity correlation of the pcm melting in spherical pcm encapsulation for the packed bed tes system. *Applied Thermal Engineering*, 135:116–122, 2018.
- [10] Jinming Shi, Waseem Aftab, Zibin Liang, Kunjie Yuan, Muhammad Maqbool, Haoyang Jiang, Feng Xiong, Mulin Qin, Song Gao, and Ruqiang Zou. Tuning the flexibility and thermal storage capacity of solidsolid phase change materials towards wearable applications. *Jour-nal of Materials Chemistry*, 8:20133–20140, 2020.
- [11] Hakan F. ztop, Fatih Selimefendigil, and Hakan Coanay. Analysis of phase change dynamics by using fin in a 3d tall cavity and modeling with artificial neural network. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 145:34–45, 2022.
- [12] Mohsen Izadi, Ahmad Hajjar, Hashim M. Alshehri, Arslan Saleem, and Ahmed M. Galal. Analysis of applying fin for charging process of phase change material inside h-shaped thermal storage. *International Com-munications in Heat and Mass Transfer*, 139: 106421, 2022.
- [13] Amirhossein Mostafavi and Ankur Jain. Thermal management effectiveness and efficiency of a fin surrounded by a phase change material (pcm). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 191: 122630, 2022.

- [14] Su Ho Kim, Chang Sung Heu, Jin Yong Mok, Seok-Won Kang, and Dong Rip Kim. Enhanced thermal performance of phase change material-integrated fin-type heat sinks for high power electronics cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 184: 122257, 2022.
- [15] Zhan Liu, Zihui Liu, Junfei Guo, Fan Wang, Xiaohu Yang, and Jinyue Yan. Innovative ladder-shaped fin design on a latent heat storage device for waste heat recovery. *Applied Energy*, 321:119300, 2022.
- [16] Junfei Guo, Xinyi Wang, Bo Yang, Xiaohu Yang, and Ming-Jia Li. Thermal assessment on solid-liquid energy storage tube packed with non-uniform angled fins. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 236:111526, 2022.
- [17] Peng Ding and Zehua Liu. Numerical investigation of natural convection enhancement in latent heat energy storage units with punched-fin and slit-fin. *International Journal of Thermal Sciences*, 163:106834, 2021.
- [18] Qing Wang, Chun xian Wu, Xinmin Wang, Shipeng Sun, Da Cui, Shuo Pan, and Hongyu Sheng. A review of eutectic salts as phase change energy storage materials in the context of concentrated solar power. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023.
- [19] Qing Wang, Chun lei Wu, Shipeng Sun, Xinmin Wang, Shuangmao Wu, Da Cui, Shuo Pan, and Hongyu Sheng. Comprehensive performance of composite phase change materials based on ternary eutectic chloride with CuO nanoparticles for thermal energy storage systems. *Solar Energy*, 2023.
- [20] Chunlei Wu, Qing Wang, Xinmin Wang, Shipeng Sun, Da Cui, Shuo Pan, and Hongyu Sheng. Thermodynamic calculations and experimental studies of ternary molten salts for high-temperature thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 2023.
- [21] Chun xian Wu, Qing Wang, Shipeng Sun, Xinmin Wang, Da Cui, Shuo Pan, and Hongyu Sheng. Comprehensive thermal properties of ternary eutectic molten salt/nanoparticles composite phase change materials for hightemperature thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023.

- [22] Dennis A. Siginer and Hsin Pang Wang. Developments and Applications of Non-Newtonian Flows. Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, 1995.
- [23] Tianluo Chen, Yang Ning, Amit Amritkar, and Guan Qin. Multigpu solution to the lattice boltzmann method: An application in multiscale digital rock simulation for shale formation. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 30, 2018.
- [24] Yutao Huo, Yunqi Guo, and Zhonghao Rao. Investigation on the thermal performance of phase change material/porous medium-based battery thermal management in pore scale. International Journal of Energy Research, 43(2):767–778, 2019.
- [25] Qing Liu, Xiang-Bo Feng, Xiao-Tao Xu, and Ya-Ling He. Multiple-relaxation-time lattice boltzmann model for double-diffusive convection with dufour and soret effects. International Journal of Heat and Mass Transfer, 139:713–719, 2019.
- [26] Yutao Huo and Zhonghao Rao. The improved enthalpy-transforming based lattice boltzmann model for solid-liquid phase change. International Journal of Heat and Mass Transfer, 133:861–871, 2019.
- [27] Mslm Arc, Ensar Ttnc, Mira Kan, and Hasan Karabay. Melting of nanoparticle-enhanced paraffin wax in a rectangular enclosure with partially active walls. International Journal of Heat and Mass Transfer, 104:7–17, 2017.
- [28] Manar S. M. Al-Jethelah, Syeda Humaira Tasnim, Shohel Mahmud, and Animesh Dutta. Melting of nano-phase change material inside a porous enclosure. International Journal of Heat and Mass Transfer, 102:773–787, 2016.
- [29] Syeda Humaira Tasnim, Rakib Hossain, Shohel Mahmud, and Animesh Dutta. Convection effect on the melting process of nanopcm inside porous enclosure. International Journal of Heat and Mass Transfer, 85:206–220, 2015.
- [30] Jure Mencinger. Numerical simulation of melting in two-dimensional cavity using adaptive grid. Journal of Computational Physics, 198:243–264, 2004.