

基于孔隙尺度研究梯度孔隙率结构对固液相变的影响

山东建筑大学热能工程学院 李佳阳 陈宝明 张艳勇 张自仕

【摘要】为了进一步研究方腔内固液相变的过程,本文基于格子玻尔兹曼方法(LBM),采用两区域模型探究了方腔内填充不同方向梯度孔隙率分布的多孔骨架固液相变过程,从孔隙尺度分析了相变过程的流动和传热机理;并对梯度孔隙率多孔介质内固液相变过程中的糊状区做了详细的描述;重点研究了方腔内不同方向梯度孔隙率分布和均匀孔隙率骨架分布对相变过程的影响。研究结果表明:在填充多孔介质固液相变过程中,传热方式由热传导逐渐向自然对流换热转变,从而导致了上薄下厚的糊状区;在填充多孔介质骨架方腔内,不同方向的梯度孔隙率分布对相变过程的影响是不同的,与均匀孔隙率相比,从左到右线性减小以及从上到下线性增加和减少的多孔介质孔隙率分布,其融化率和高温壁面平均 Nu 数都较大,表明其孔隙率梯度分布的多孔骨架对相变换热起到了明显的促进作用;而当多孔介质孔隙率分布从左到右线性增加时,相变过程则受到明显的抑制。

【关键词】固液相变;梯度孔隙率;两区域模型

DOI 编码:10.16641/j.cnki.cn 11-3241/tk.2020.02.025

Study on the Effect of Gradient Porosity Structure on Solid-liquid Phase Transition Based on Pore Scale

school of thermal engineering of Shandong Jianzhu University

Li jiayang, Chen Baoming, Zhang yanyong, Zhang zishi

Abstract: In order to further study the process of solid-liquid phase change in a square cavity, based on the lattice Boltzmann method (LBM), a two-zone model is used to investigate the solid-liquid phase transition of a porous skeleton filled with gradients in different directions. In the process, the flow and heat transfer mechanism of the phase transition process were analyzed from the pore scale. The mushy zone in the process of gradient solid porosity and liquid phase transformation was described in detail. The gradients in different directions in the cavity were studied. The effect of porosity distribution and uniform porosity skeleton distribution on the phase transition process. The results show that in the process of solid-liquid phase change of porous media, the heat transfer

mode changes from heat conduction to natural convective heat transfer, which leads to a thick and thick mushy zone; in the cavity filled with porous media, The gradient porosity distribution in different directions has different effects on the phase transition process. Compared with the uniform porosity, the linear decrease from left to right and the porosity increase and decrease of the porous medium from top to bottom, the melting rate The average Nu number of the high temperature wall is large, which indicates that the porous skeleton with the porosity gradient distribution promotes the phase change heat. When the porosity distribution of the porous medium increases linearly from left to right, the phase transition process Obviously inhibited.

Keywords: solid-liquid phase transition; gradient porous; a two-zone model

0 前言

相变储能材料(PCM)由于具有较高的储能密度和等温特性,在太阳能加热系统、热管理系统等方面发挥着重要作用。在各种相变材料中,石蜡等有机相变材料具有潜热大、循环稳定性好、成本低、无毒等优点,被广泛应用于低温到中温的热能转换中。然而,传统有机PCM导热系数低,导致其能量转化效率低,其形状稳定性差,通常会造成固-液转变后有机组分的泄漏。这些缺点限制了有机PCM的应用。为了解决这些问题,大量学者进行了许多有益的探究^[1-3],主要有(1)安装金属翅片;(2)在相变材料中填充高导热性的纳米粒子;(3)添加热管;(4)将PCM填充在多孔材料或泡沫金属中。在这些技术中,泡沫金属由于其表面积大、孔隙率高、导热系数高、强度高、重量轻等优点,在改善导热系数方面显得更为有效。

许多研究人员对泡沫金属复合相变材料的相变过程进行了相关研究。在众多的实验研究中,Zhuo等人^[4]采用泡沫铜填充到相变材料中,实验结果表明,采用泡沫铜的固态相变材料的相变速率可提高28.1倍。Chen等人^[5,6]研究了石蜡在开孔泡沫铝中的相变传热。Allen和Xie^[7]的实验结果表明,泡沫铝的加入可以提高相变材料25.2%的传热性能。Xiao等人^[8]制备了石蜡镍泡沫和石蜡铜泡沫

复合相变材料,导热系数分别是纯石蜡的3倍和15倍左右。Yang等人^[9]在实验中研究了相变过程中铜泡沫对相变材料石蜡的影响。

对于相变材料中填充泡沫材料的数值模拟,主要分为基于REV尺度和基于孔隙尺度。为了克服REV尺度在多孔介质内部骨架和空隙结构之间流动和传热方面方法的不足,近些年基于孔隙尺度的微观研究由于其可以得到多孔介质内部骨架和孔隙之间的详细信息而越来越受到学者的关注。Chen^[10]使用格子-Boltzmann方法在二维计算域中对石蜡在泡沫铝金属中的熔化进行了孔隙尺度数值研究。Wang^[11]等基于孔隙尺度数值方法采用由六个四面体和两个不规则十二面体组成的W-P模型,模拟了开孔泡沫金属在恒温条件下的熔化传热过程。Hu^[12]等基于孔隙尺度数值方法计算了复合相变材料的温度变化和熔化过程。研究了泡沫金属的孔隙率、孔密度等几何参数对复合材料热性能的影响。Abishek^[13]等研究了微观形态对金属泡沫石蜡复合材料的影响,高孔隙率泡沫金属复合材料有利于提高和控制相变材料的熔化速度,用于热能储存或过程温度控制。Jany和Bejan^[14,15]基于孔隙尺度分析了填充多孔介质耦合自然对流现象相变材料的融化过程,得到了自然对流下 Re 数对壁面平均 Nu 数的影响。果东彦^[16]等基于孔隙尺度分析了 Ra 数、

孔隙率及孔密度等对融化相变传热过程的影响。宋林泉^[17]等人基于孔隙尺度采用 QSGS 生成多孔介质研究了多孔介质骨架的导热性能、孔隙率等因素对糊状区的影响规律。

以上国内外研究现状关于相变材料内填充多孔介质骨架(泡沫材料)来改善相变材料的物性所用的骨架材料, 其孔隙率往往是给定均匀的。一种孔隙率不均匀的梯度结构的多孔介质骨架已经应用于强化传热、蒸发沸腾、声学、医学、过滤等许多方面。Wang^[18]等把梯度多孔材料结构应用于散热器来强化传热, 并与均匀多孔散热器进行比较。Zhao^[19]等把梯度多孔金属应用于沸腾传热, 与均匀多孔金属相比, 梯度多孔金属中气泡更容易逸出。华北电力大学的杨家林^[20]首次把梯度孔隙率结构应用于相变蓄能中, 结果表明与等孔隙率相比, 由下向上线性增加的孔隙率可以改善传热性能, 缩短完全熔化时间。冯竹^[21]把具有渐变孔隙率的金属泡沫结构应用于相变蓄能, 以进一步加速复合材料的熔化过程。但有关梯度结构应用于相变蓄能方面以此来改善相变材料的物性, 大都是基于 REV 尺度来研究的, 由于多孔介质内部结构的复杂性以及固液相变过程中糊状区内流动和换热高度非线性的特点。传统的数值计算方法在计算有关多孔介质内相变传热时往往遇到边界复杂、并行计算效率低的问题。而格子 Boltzmann 方法正好解决了传统数值模拟在处理多孔介质内固液相变遇到的问题。He^[22]等对格子玻尔兹曼方法在多孔介质中单相和固液相变传热研究中的应用进行了详尽的综

述, 认为 LBM 将在多孔介质固液相变传热的研究中发挥越来越重要的作用。虽然目前大量对无填充多孔介质的固液相变过程研究表明, 相变过程中固液共存的区域(糊状区)会显著影响固液相变的过程^[23,24], 但对于填充多孔介质骨架方腔的储能材料固液相界面的传递机理缺乏进一步的研究, 尤其是相界面糊状区的传热和流动的模型缺少深入的探讨。本文基于孔隙尺度采用描述糊状区流动特征的“多孔介质-多相流复合”模型^[25,26], 即在靠近固相表面的低含液率糊状区采用多孔介质渗流模型, 而在高含液率区域采用多相流模型来探究梯度多孔介质对固液相变的影响, 以此来为梯度骨架应用于实际工程提供理论指导。

1 物理模型

多孔骨架模型如图 1 所示, 方腔的边长都为 H , 腔体内填充着正方形多孔介质骨架共 5×5 个, 案例 1 (Case 1) 内部填充着均匀分布的固体骨架, 案例 2 (Case 2) 和案例 3 (Case 3) 分别为从左到右孔隙率分布线性减少和增大的多孔骨架模型, 案例 4 (Case 4) 和案例 5 (Case 5) 分别为从上到下孔隙率分布线性增加和减少的多孔骨架模型。计算可得其相应孔隙率都为 0.85。图中黑色部分代表固体骨架, 而白色部分填充均匀的相变材料。方腔内部填充相变材料, 相变材料的相变温度区间中心温度为 $T_m=0.25$, 其相应的相变温度半径为 $T_R=0.10$, 方腔上下壁面为绝热壁面, 整个方腔内, 初始温度 $T_0=0$ 。融化的初始时刻, 右壁面为低温壁面 $T_c=0$, 左侧的高温壁

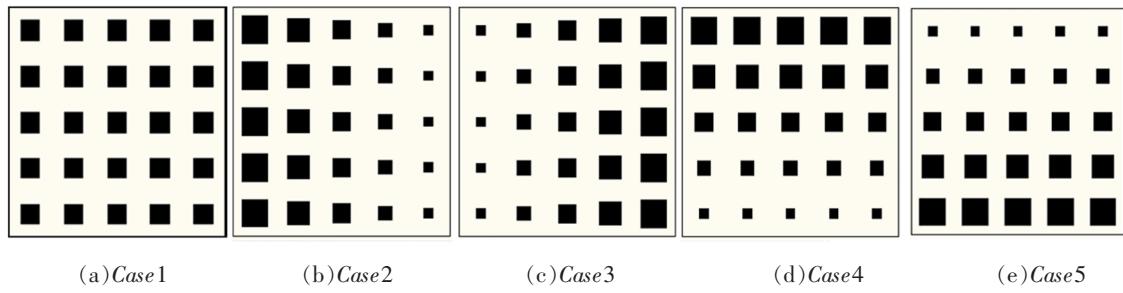


图 1 方腔内多孔介质骨架模型示意图

面温度 $T_h=1$ 高于相变材料的融化温度。

2 数学模型

2.1 控制方程

建立用于研究相变糊状区的两区域模型。将其中的低含液率区 ($r_{fl} < r_{tr}$) 看做为多孔介质区, 流动状态形式为多孔介质渗流, 并建立多孔介质渗流数学模型; 将高含液率区 ($r_{fl} > r_{tr}$) 看做为多相流区域, 流动状态形式为固-液两相流, 并建立多相流模型, 模型中相关物性参数则用相应的表征参数代替。在此建立的数学模型中高低含液率的分界点为 $r_{tr}=0.7$ 。

填充多孔骨架的固-液相变过程具有典型的非线性特征, 为了在保证计算精度的前提下, 提高计算效率, 需要进行一些的合理的假设和简化:

1) 将流体看做不可压缩流体, 流动状态设定为层流; 2) 将固体材料及填充的多孔介质骨架物性视为定值; 3) 流体流动遵循 Boussinesq 假设。

根据上述的简化和假设以及缩写公式, 填充多孔骨架的固-液相变糊状区的控制方程可写成:

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

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \frac{\mathbf{u}}{\varepsilon} = -\frac{1}{\rho_{fl}} \nabla (\varepsilon \rho) + \nu_e \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$[\varepsilon (\rho c_p)_{fl} + (1-\varepsilon) (\rho c_p)_{fs}] \frac{\partial T_{fl}}{\partial t} + (\rho c_p)_{fl} (\mathbf{u} \cdot \nabla T_{fl}) = k_{total} - \nabla^2 T_{fl} - \varepsilon \rho_{fl} La \frac{\partial r_{fl}}{\partial t} \quad (3)$$

式中: \mathbf{u} 为渗流速度矢量, m/s ;

ε 表示多孔介质孔隙率, $\varepsilon=0$ 为固相区, $\varepsilon=1$ 为液相区, $0 < \varepsilon < 1$ 为糊状区;

ρ 为密度, kg/m^3

p 为渗流表观压力, Pa ;

T 为温度, K

C_p 为热容, J/K

fl 和 fs 分别表示相变材料液相和固相;

ν_e 为有效运动粘性系数, m^2/s ;

F 为外力源项, 而:

$$F = -\frac{\varepsilon \nu_{fl}}{K} \mathbf{u} - \frac{\varepsilon F_e}{\sqrt{K}} \mathbf{u} |\mathbf{u}| + \varepsilon g \beta (T - T_{ref}) \quad (4)$$

其中: ν_{fl} 为液相流体的动力粘性系数, m^2/s ;

K 为多孔介质的渗透率;

F_e 为多孔介质的形状因子;

β 为热膨胀系数, $1/\text{K}$ 。

k_{total} 为有效导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

La 为相变潜热;

r 表示液相率。

在糊状区的低含液率区域 ($r_{fl} < r_{tr}$), 对应的渗透率、有效导热系数分别由式(5)、式(6)表示为:

$$K = \frac{r_{fl}^3}{C(1-r_{fl})^2} \quad (5)$$

$$k_{total} = (1-\varepsilon) k_{fs} + \varepsilon k_{fl} \quad (6)$$

按照两区域模型对糊状区进行分析, 对于呈现出两相流特点的高含液率区 ($1 > r \geq r_{tr}$) 应该采用两相流模型的表征参数法^[13,14]。该方法是参考潜热型流体为强化其传热效果而在流体中添加相变微小颗粒。由于两相流模型建立比较复杂, 因此可采用经验和半经验公式来建立表征参数, 用以分析糊状区内高含液率区的流动和传热情况。特征参数表达式如下所示:

$$k_{total} = k_{fl} \cdot \frac{2+k_{fs}/k_f + 2\phi(k_{fs}/k_f - 1)}{2+k_{fs}/k_f - \phi(k_{fs}/k_f - 1)} \quad (7)$$

$$\nu_e = \nu_0 (1-\phi - 1.1\phi^2)^{-2.5} \quad (8)$$

式中: ϕ 为相变材料固相体积分数, 即 $\phi = 1 - r_{fl}$ 。

多孔介质骨架传热为纯导热过程能量方程由(9)表示为:

$$(\rho c_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \nabla^2 T_s \quad (9)$$

式中: k_s 表示多孔骨架的导热系数;

T_s 表示多孔骨架的温度。

采用焓法^[16]求解液相率, 相变材料在某温度时的焓值由式(10)表示为:

$$En = (c_p T)_f + r_{fl} La \quad (10)$$

相变材料的焓值 En 和温度 T_f 之间的关

系由式(9)表示为:

$$T_f = \begin{cases} \frac{En}{c_{pf}}, & En < En_s \\ T_{fs} + \left(\frac{2T_R}{La + 2c_{pf}T_R} \right) (En - En_s), & En_s \leq En \leq En_l \\ \frac{En - La}{c_{pf}}, & En > En_l \end{cases} \quad (11)$$

式中: En_s 和 En_l 分别表示相变开始时相应温度 T_{fs} 的焓值和相变完成时对应温度 T_{fl} 相应的焓值;

T_R 表示相变半径, $T_R = (T_{fl} - T_{fs})/2$ 。

根据相变材料的液相率和焓值之间的关系, 计算得到公式(12)为:

$$r_{fl} = \frac{En - En_s}{En_l - En_s} \quad (12)$$

由式(10)、式(11)结合式(12)可知, 多孔介质骨架传热的纯导热方程(9)中的温度场与含液率是相互耦合的, 可以通过数值迭代求解。为减少控制方程中的变量, 探讨相变过程中糊状区对相变过程影响的机理, 引入以下无量纲参数:

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{uH}{a_{fl}}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, P = \frac{pH^2}{H^2}, F_o = \frac{ta_{fl}}{H^2}, Pr = \frac{v_{fl}}{a_{fl}}, Ra = \frac{g\beta(T_h - T_c)H^3}{\nu_{fl}a_{fl}}, \\ Ste &= \frac{(c_p)_{fl}(T_h - T_c)}{La}, \sigma = \frac{\rho c_p}{(\rho c_p)_{fl}}, R = \frac{k}{k_{fl}}, Da = \frac{K}{H^2}, \end{aligned}$$

获得对应的无量纲控制方程: 孔隙尺度下的连续性方程、动量方程、能量方程和多孔骨架能量方程分别由式(13)~式(16)表示为:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{Pr\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial F_o} + \frac{1}{Pr\varepsilon^2} (u \cdot \nabla) u &= -\nabla P + \frac{1}{\varepsilon} \nabla^2 u - \\ \left(\frac{1}{Da} + \frac{F_e}{Pr\sqrt{Da}} |u| \right) u + Ra\theta_{fl} \frac{g}{|g|} & \quad (14) \end{aligned}$$

$$\sigma_{total} \frac{\partial \theta}{\partial F_o} + u \cdot \nabla \theta = R_f \nabla^2 \theta_f - \frac{\varepsilon}{Ste} \frac{\partial r_{fl}}{\partial F_o} \quad (15)$$

$$\sigma_s \frac{\partial \theta_s}{\partial F_o} = R_s \nabla^2 \theta_s \quad (16)$$

2.2 相变格子玻尔兹曼方法

采用双分布格子玻尔兹曼方法 D2Q9 模型进行求解, 其模型对应的速度和温度演化方程及平衡态方程, 由式(17)~式(19)^[15]表示为:

$$\begin{aligned} f_i(r + e_i \delta t, t + \delta t) - f_i(r, t) &= -\frac{1}{\tau_f} [f_i(r, t) \\ - f_i^{eq}(r, t)] + \delta t F_i \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} g_i(r + e_i \delta t, t + \delta t) - g_i(r, t) &= -\frac{1}{\tau_T} [g_i(r, t) \\ - g_i^{eq}(r, t)] + \delta t S_{ri} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} f_i^{eq} &= \rho w_i \left[1 + \frac{e_i \cdot u}{c_s^2} + \frac{(e_i \cdot u)^2}{2\varepsilon c_s^4} - \frac{u^2}{2\varepsilon c_s^2} \right] g_i^{eq} \\ &= w_i T \left[1 + \frac{e_i \cdot u}{c_s^2 \sigma_{total}} + \frac{(e_i \cdot u)^2}{2c_s^4 \sigma_{total}^2} - \frac{u^2}{2c_s^2 \sigma_{total}^2} \right] \end{aligned} \quad (19)$$

式中: 对应源项 F_i, S_{ri} 分别由(20)、(21)表示为:

$$F_i = \left(1 - \frac{1}{2\tau_f} \right) w_i \rho \left[\frac{e_i \cdot F}{c_s^2} + \frac{u F \cdot (e_i e_i - c_s^2 I)}{\varepsilon c_s^4} \right] \quad (20)$$

$$\begin{aligned} S_{ri} &= -w_i \varepsilon \frac{La}{(c_p)_{fl}} \frac{[r_{fl}(t + \delta t) - r_{fl}(t)]}{\delta t} \\ &[1 + (1 - \frac{1}{2\tau_T}) \frac{e_i \cdot u}{c_s^2}] \end{aligned} \quad (21)$$

式中: F 由式(4)表示;

速度与温度演化方程中无量纲松弛时间

由 $\tau_f = \nu \frac{1}{c_s^2 \delta_t} + \frac{1}{2}, \tau_T = \alpha \frac{1}{c_s^2 \delta_t} + \frac{1}{2}$ 确定。

宏观密度和速度由式(19)统计求和得:

$$\rho = \sum_i f_i \quad \rho u = \sum_i e_i f_i + \frac{\delta t}{2} \rho F \quad T = \sum_i g_i \quad (22)$$

由于外力源项 F 中含有流动速度, 通过迭代求解可得:

$$u = V / (c_0 + \sqrt{c_0^2 + c_1 |V|}) \quad (23)$$

其中: V 为一临时速度, $\rho V = \sum_i e_i f_i +$

$$\frac{\delta t}{2} \varepsilon \rho G;$$

c_0, c_1 分别为: $c_0 = \frac{1}{2} (1 + \varepsilon \frac{\delta t}{2} \frac{\nu}{K})$ 和 $c_1 =$

$$\varepsilon \frac{\delta t}{2} \frac{F_e}{\sqrt{K}}.$$

使用 Chapman-Enskog 展开, 可得到式

(17)、式(18)对应的宏观方程式(1)~(4)。

3 求解和验证

图 2 所示为使用四种不同网格下, 在 $Ra=5.0 \times 10^5, Pr=1, Ste=5$ 时高温壁面平均 Nu 随无量纲时间 Fo 的变化曲线图。以网格数 180×180 作为基准, 比较高温壁面平均 Nu 的平均相对误差, 比较结果如表 1 所示。由表可知, 随着网格数的不断增加, 平均相对误差逐渐变小; 当网格数为 180×180 时, 其相对于 180×180 网格数相对误差为 1.904%。因此可以认为 150×150 为最优网格数。

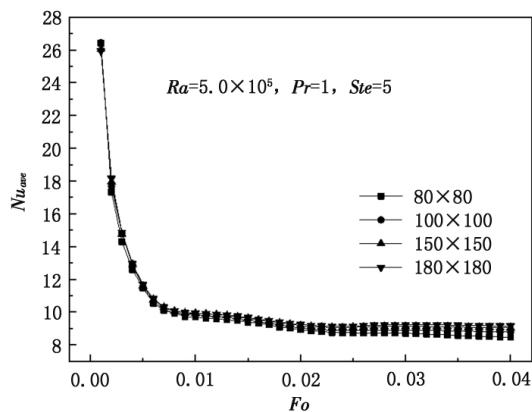


图 2 高温壁面平均 Nu 数随无量纲时间 Fo 的变化

表 1 不同网格数下平均相对误差

网格数	80×80	100×100	150×150
平均相对误差/%	4.328	3.258	1.904

在目前所研究的相变蓄热研究中, 纯相变材料腔体内有糊状区存在的相变蓄热过程没有基准解。因此为了检验本文 LBM 模型的准确性, 对腔体内加入有单一熔化温度的相变材料进行数值模拟。高×宽=H×H 的腔体, 初始腔体内温度为 $T_c=0$, 融点温度为 $T_m=0$ 的相变材料, 相变半径 $T_R=0$ 。左侧温度恒定 $T_h=1$, 其它壁面为绝热壁面。采用 Jany 和 Bejan 提出的高温壁面平均 Nu 数的关联式作为基准解, 由式(24)^[28]表示为:

$$Nu_{avg}=2 \cdot (Fo \cdot Ste)^{-1/2} + [Nu_\infty - 2 \cdot (Fo \cdot Ste)^{-1/2}] \cdot [1 + (0.0178Ra^{3/4}(Fo \cdot Ste)^{3/2})^{-2}]^{-1/2} \quad (24)$$

式中: 采用 Benard 等^[29]的计算公式为: $Nu_\infty = 0.33Ra^{1/4}$ 。

这里采用 $Pr=10.0, Ste=0.1, Ra$ 数分别为 $1 \times 10^4, 1 \times 10^5, 1 \times 10^6$ 三种工况下, 对腔体内纯相变材料相变蓄热过程进行数值模拟。采用孔隙率 ε 分别为 0.4、0.6, Da 数分别为 $1 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-2}, Ra=1 \times 10^5, Pr=1$ 的条件下, 对多孔介质方腔中的流体进行自然对流数值模拟。在纯相变模拟中, 计算出三种工况下高温壁面平均 Nu 数的大小与关联式(24)的经典解进行对比分析, 如图 3 所示。在多孔介质腔体内自然对流模拟中计算的结果和文献^[30]进行对比分析, 从表 2 可以看出, 数值解和经典解的平均相对误差率均小于 1%, 因此可以认为本文建立的数学模型是正确的。

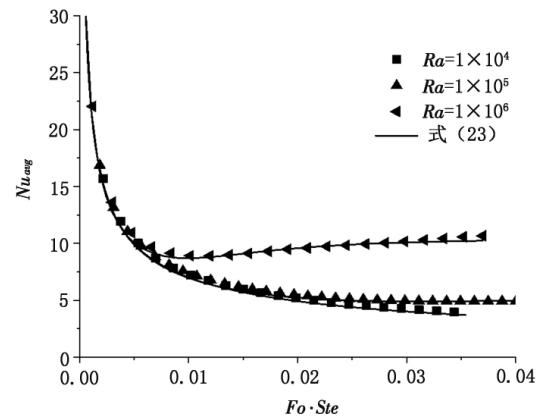


图 3 左壁面平均 Nu 数的 LBM 数值解与 Jany 和 Bejan 基准解的对比图 ($Pr=10.0, Ste=0.1$)

表 2 方腔内自然对流 LBM 数值解与经典解的对比结果

Ra	Da		$\varepsilon=0.4$	$\varepsilon=0.6$
		模型计算结果	1.069	1.073
$Ra=1 \times 10^5$	1×10^{-4}	文献 ^[30]	1.067	1.071
		相对误差率/%	0.1874	0.1867
		模型计算结果	4.925	5.679
$Ra=5 \times 10^5$	1×10^{-2}	文献 ^[30]	4.99	5.74
		相对误差率/%	1.303	1.063

4 结果与分析

4.1 梯度孔隙率对相变蓄热过程的影响

基于本文的两区域模型，当 $Pr=1.0$, $Ra=1\times 10^6$, $Ste=5.0$, $T_R=0.10$ 时，采用 LBM 对

五种填充不同多孔介质骨架方腔内的固液相变过程进行了模拟研究，选取了 $Fo=0.01$ 、 $Fo=0.03$ 、 $Fo=0.05$ 和 $Fo=0.1$ 时刻的工况描述其相应的含液率场分布图 4 所示，在整个熔

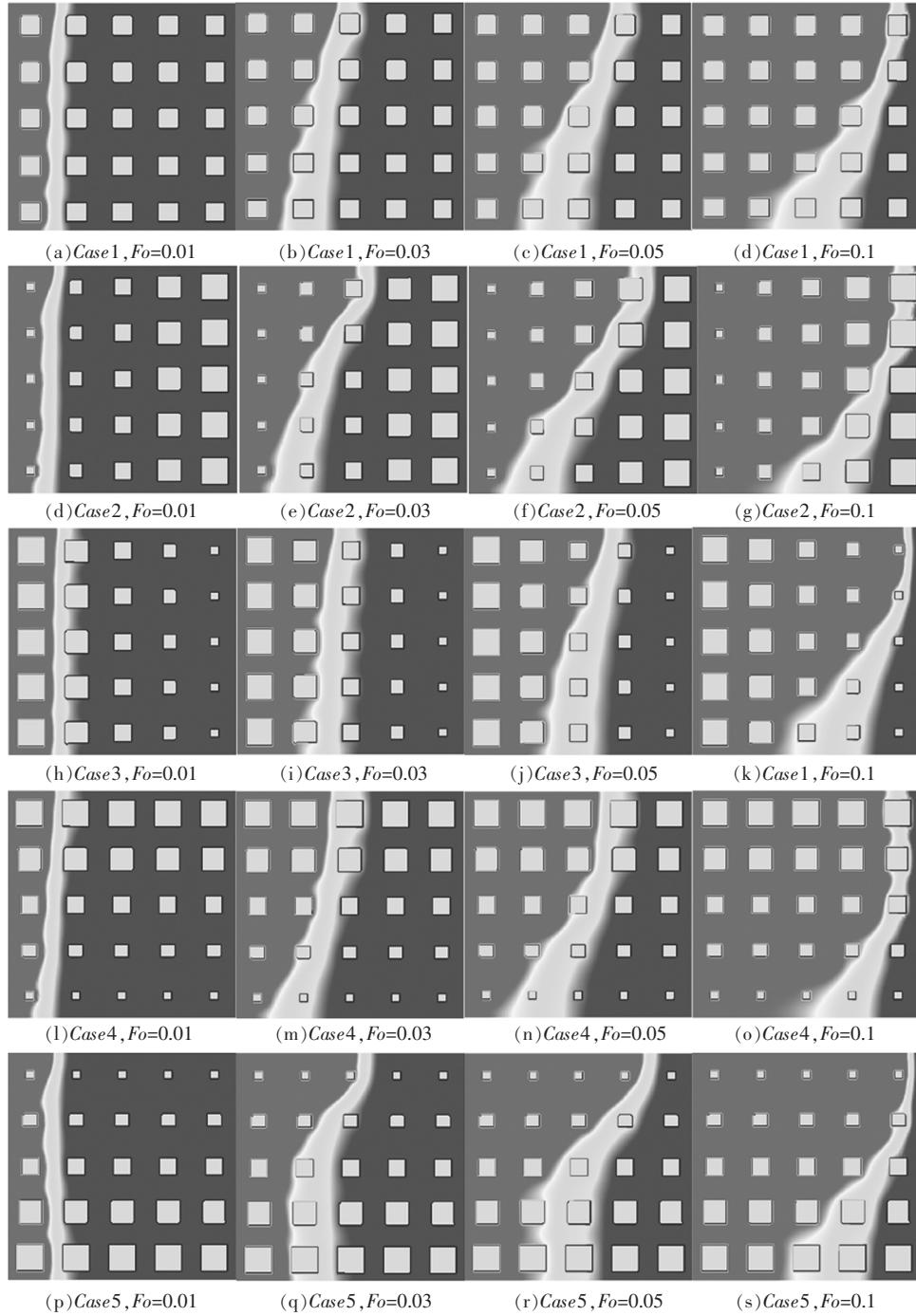


图 4 梯度孔隙率下不同时刻液相率场分布

化过程中有两个明显的相变界面, 它们本质上是 $T_{fs}(T_m-T_R)$ 和 $T_{fl}(T_m+T_R)$ 的等温表面。两个界面将计算区域划分为三个区域, 即图 4 中显示为蓝色(右侧)部分的固相区域、显示为红色(左侧)部分的液相区域和显示为从蓝色到红色过渡(中间)部分的糊状区域, 白色(方块)部分为固体骨架。从图 4 中可以看出, 在加热过程中, 随着无量纲时间的延长, 液相区逐渐增大, 固相区逐渐收缩, 糊状区逐渐增厚, 且呈现上窄下宽的形状。随着液相区的扩大, 自然对流变得显著。相变界面附近的传热机理也由热传导为主转变为自然对流传热为主。因此, 界面附近的吸热变得困难。液相界面附近的温度升高较为平缓, 导致糊状区扩大。糊状区的厚度直接影响换热性能的强弱。在自然对流浮升力的作用下, 流体先流经方腔上部, 自然对流强度较大, 然后再流到方腔下部, 自然对流变弱。导致方腔上方得到的热量多于下部, 因此糊状区发生弯曲, 且呈现上窄下宽的形状, 同时可以看到糊状区边界的不平滑。这主要是由于固体骨架的传热引起的。

图 4 还显示了填充不同朝向梯度孔隙率固体骨架的相变材料融化过程。图 4 (Case1) 显示了孔隙率均匀情况下的融化过程, 孔隙率为 0.82; (Case2) 显示了孔隙率从左到右逐渐减小条件下的融化过程 (ε 为 0.96–0.64), 平均孔隙率为 0.82; (Case3) 显示了孔隙率 (ε) 从左到右逐渐增加条件下的相变材料随时间融化的过程 (ε 为 0.64–0.96), 平均孔隙率 (ε) 同样为 0.82。Case4 显示了孔隙率从上到下逐渐增加条件下的融化过程 (ε 为 0.64–0.96), 平均孔隙率为 0.82; Case5 显示了孔隙率 (ε) 从上到下逐渐减少条件下的相变材料随时间融化的过程 (ε 为 0.64–0.93), 平均孔隙率 (ε) 同样为 0.82。在 $Fo=0.03$ 时, Case2 糊状区倾斜越明显, 自然对流强度最大, 与均匀孔隙率相比, 自然对流得到增强; 相反 Case3 倾斜程度最弱, 自然对流被削弱; 同样时间下

Case4 和 Case5 与 Case1 相比, Case4 上部糊状区形状与上壁面垂直, 下部更加倾斜, Case5 表现出相反的现象。

4.2 梯度孔隙率对相变材料融化率和换热强度的影响

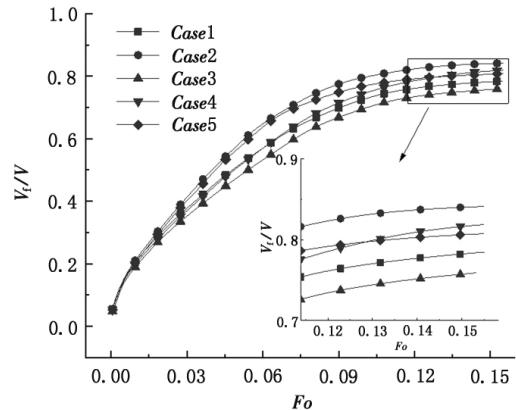
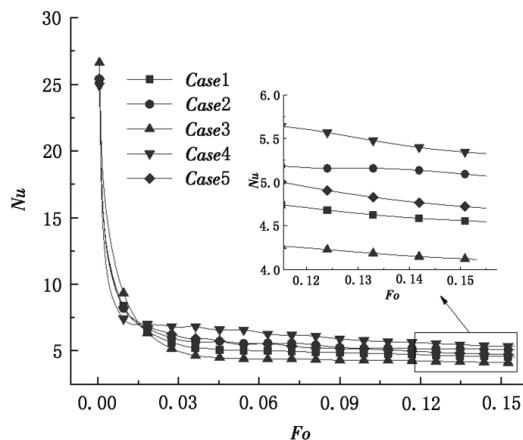


图 5 梯度孔隙率下融化率随 Fo 数变化

图 5 表示在 $Pr=1.0, Ra=1\times 10^6, Ste=5.0, T_R=0.10$ 时, 不同方向梯度孔隙率下融化率随无量纲时间 Fo 数的变化图。从图中可以看出, 在相变发生的初期 ($Fo<0.02$), 不同结构下的融化速率很相近。随着时间的增加孔隙率 (ε) 结构从左到右增加或者减小以及孔隙率自下而上增加的条件下, 与孔隙率均匀时的情况相比, 熔化速度加快, 且在达到准稳态时, 最终的融化率增加, 且孔隙率 (ε) 从左到右融化速率最快。相反, 孔隙率从上到下递减的结构减缓了融化过程且最终的总融化率最小。最终的相变材料融化率小于 1, 是由设置的边界条件和相变温度引起的, 右壁面边界条件温度为零, 而相变温度 T_R 等于 0.1, 故最终的相变材料融化率小于 1。

图 6 显示了在相同条件下, 不同方向梯度孔隙率下左壁面 Nu 随无量纲时间 Fo 数的变化图。结果表明, 在任何梯度孔隙率梯度条件下, 在相变发生的初期 ($Fo<0.01$), 左壁面平均 Nu 数都随着时间的增长而急剧下降, 主要是因为在开始阶段传热方式由导热为主向自然对流换热转变; 在相变发生的中期

图 6 梯度孔隙率下左壁面 Nu 随 Fo 数变化

($0.01 < Fo < 0.1$), 自然对流逐渐占据主导作用, 平均 Nu 数减小变得缓慢, 直到达到相变末期 ($Fo > 0.1$), 换热方式主要为自然对流换热。

分析其不同梯度结构对相变材料融化过程的影响, 当孔隙率从左到右逐渐减小 (Case2) 时, 在方腔内融化的前期, 由于导热方式主要为导热, 孔隙率的变化对融化过程没有太大影响, 其孔隙率与规则孔隙率 (Case1) 相比, 孔隙率较大, 由于骨架的存在对自然对流起到一定的阻碍作用, 故此 (Case2) 时, 骨架对自然对流的影响较少, 热量更容易从高温壁面向低温壁面传递, 相对于均匀孔隙率骨架 (Case1) 而起到一定的强化作用; 相反, 对于 (Case3) 情况时, 由于孔隙率从左到右逐渐增加, 在融化前期孔隙率较小, 又有骨架的阻碍作用, 复合相变材料的总的热阻增加, 与 (Case1) 情况时相比其孔隙率的变化起到一定的阻碍作用。

5 结论

本文基于孔隙尺度对方腔内填充梯度孔隙率多孔介质骨架固液相变的问题进行了数值模拟, 对糊状区采用两区域模型(高液相区采用多相流模型, 低液相区采用多孔介质渗流的扩展达西模型), 采用格子 Boltzmann 方法, 分析不同方向梯度孔隙率分布多孔骨架对固液相变流动和换热的影响。得出以下结

论。

(1) 对于方腔内填充梯度孔隙率多孔介质骨架的固液相变过程, 相变开始的初期传热的方式主要是导热, 糊状区与上下壁面近似垂直, 随着相变的继续进行, 传热的主要方式由导热转化成自然对流传热, 糊状区缓慢向前推移, 并开始发生弯曲, 出现上窄下宽的不规则形状。

(2) 方腔内填充梯度孔隙率多孔介质骨架对固液相变过程有很大影响, 且不同方向孔隙率梯度分布对相变过程的影响是不同的。孔隙率从左到右孔隙率逐渐减小的梯度分布 (Case2) 相比于均匀孔隙率 (Case1) 其融化速率和热壁面平均 Nu 数都有所增加, 其梯度变化的孔隙率分布对多孔介质固液相变过程起到了增强作用; 相反对于孔隙率从左到右孔隙率逐渐增大的梯度分布 (Case3) 相比于均匀孔隙率 (Case1) 分布的固液相变过程起到了削弱作用。

参考文献

- [1] LIN Y, JIA Y, ALVA G, et al. Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2018, 82: 2730–2742.
- [2] QURESHI Z A, ALI H M, KHUSHNOOD S. Recent advances on thermal conductivity enhancement of phase change materials for energy storage system: A review [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127: 838–856.
- [3] ZHANG N, YUAN Y, CAO X, et al. Latent heat thermal energy storage systems with solid – liquid phase change materials: a review [J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20(6): 1700753.
- [4] ZHOU D, ZHAO C Y, Experimental investigations on heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous materials [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(5): 970–977.
- [5] CHEN Z.Q, GU M.W, PENG D.H. Heat transfer

- performance analysis of a solar flat-plate collector with an integrated metal foam porous structure filled with paraffin [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(14-15): 1967-1973.
- [6] CHEN Z.Q, JUAN S. Experimental and numerical study on melting of phase change materials in metal foams at pore scale [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2014, 72: 646-655.
- [7] ALLEN M.J, BERGMAN T.L. et al. Robust heat transfer enhancement during melting and solidification of a phase change material using a combined heat pipe-metal foam or foil configuration [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2015, 137(10).
- [8] XIAO X, ZHANG P, LI M. Preparation and thermal characterization of paraffin/metal foam composite phase change material [J]. *Applied energy*, 2013, 112: 1357-1366.
- [9] YANG J, YANG L, XU C, et al. Experimental study on enhancement of thermal energy storage with phase -change material [J]. *Applied energy*, 2016, 169: 164-176.
- [10] CHEN Z, GAO D, SHI J. Experimental and numerical study on melting of phase change materials in metal foams at pore scale [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 72: 646-655.
- [11] WANG G, WEI G, XU C, et al. Numerical simulation of effective thermal conductivity and pore-scale melting process of PCMs in foam metals [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 147: 464-472.
- [12] HU X, GONG X. Pore-scale numerical simulation of the thermal performance for phase change material embedded in metal foam with cubic periodic cell structure [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 151: 231-239..
- [13] ABISHEK S, KING A J C, NADIM N, et al. Effect of microstructure on melting in metal-foam/paraffin composite phase change materials [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 135-144.
- [14] JANY P, BEJAN A. Scales of Melting in the Presence of Natural Convection in a Rectangular Cavity Filled With Porous Medium [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1988, 110(2):526-529.
- [15] BEJAN A. Theory of melting with natural convection in an enclosed porous medium [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1989, 111(2):407-415.
- [16] 崔东彦, 陈振乾, 孙东科. 泡沫金属内相变材料融化的格子 Boltzmann 方法孔隙尺度模拟研究 [J]. *工程热物理学报*, 2016, V37(2):385-390.
- [17] 宋林泉, 陈宝明, 郁凯凯. 基于 LBM 的多孔骨架热物性对固液相变的影响研究 [J]. *山东建筑大学学报*, 2017(04):54-62.
- [18] WANG B, HONG Y, WANG L, et al. Development and numerical investigation of novel gradient - porous heat sinks [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 106: 1370-1378.
- [19] QIN J, ZHOU X, ZHAO C Y, et al. Numerical investigation on boiling mechanism in porous metals by LBM at pore scale level [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 130: 298-312.
- [20] YANG J, YANG L, XU C, et al. Numerical analysis on thermal behavior of solid - liquid phase change within copper foam with varying porosity [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 84: 1008-1018.
- [21] ZHU F, ZHANG C, GONG X. Numerical analysis on the energy storage efficiency of phase change material embedded in finned metal foam with graded porosity [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 123: 256-265.
- [22] HE Y L, LIU Q, LI Q, et al. Lattice Boltzmann methods for single-phase and solid-liquid phase-change heat transfer in porous media: A review [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 129: 160-197.
- [23] VOLLMER V R, PRAKASH C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection - diffusion mushy region phase-change problems [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1987, 30(8): 1709-1719.
- [24] MEHRABIAN R, KEANE M, FLEMINGS M C. Interdendritic fluid flow and macrosegregation; influence of gravity [J]. *Metallurgical and Materials*

(下转第 150 页)

2)设备遥控器控制,减少了人手需求及尽量减少人为错误;3)操作数据收集和分析,提高了操作准确性和安全性;4)自动输出调整,节约能源并确保安全运营。

凭借我公司的智能供热网络系统,我们已减少日常供热营运及维护人员,同时我们的供热服务面积持续增长。

以智能科技代替传统人工,实现了大数据综合分析,以往热源分配不均,致使热量不足的时候,需要启动调峰锅炉房,现通过智能供热网络系统,可以在控制中心实现各供热区域热网均衡、热力站远程调控等功能,有效提升了能源的使用效率,间接减少污染物排放,对改善城市环境污染,提高居民供热质量具有显著的社会效益,对企业持续发展来讲,具有较高的经济效益,是节能减排的重要手段。

加大智能供热网络系统的使用效率,使该指挥系统在供暖期能够对全网参数进行统一监控和管理,实时、全面调控供热系统的运行工况,协调热源供给,以适应热网负荷变化,安全合理地进行供热系统的调度,实现均衡供热。同时,在该系统内加入了收费系统、客服系统等数据,能够及时处理相关用户投

诉,便捷热用户相关业务办理,有助于提升社会效益。

智能供热网络系统平台实现了公司可以用精准的数据、合理的调控,有效提升供热系统优化运行和保障能力,推进热网运行安全和能源的合理应用,达到平衡监控、科学调节的智慧供热目标。

3 总结

科学的成本管控方法对供热企业降低成本,提高企业的竞争力,增加企业的经营效益起到至关重要的作用。

2016 年至 2018 年我公司长春市内生产单位在网面积和主营业务总成本逐年增加,但单位面积供热成本逐年下降,体现了成本管控的实效。

今后,公司继续坚持稳中求进的步调,努力做好供热事业,强化供热成本管控,保障供热企业健康发展。

参考文献

(上接第 141 页)

- Transactions, 1970, 1(5): 1209-1220.
- [25] CHEN B, SONG L, GAO K, et al. Two zone model for mushy region of solid -liquid phase change based on Lattice Boltzmann method [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2018, 98: 1-12.
- [26] 陈宝明, 鄢凯凯, 姜昊. 固-液相变糊状区的格子 Boltzmann 研究, 工程热物理学报, 2017, 38(11): 2453-2460.
- [27] ZHAO Li G. Principle and application of lattice Boltzmann method [M]. Science press, Beijing, 2009.
- [28] JANY P, BEJAN A. Scales of melting in the presence of natural convection in a rectangular cavity filled with porous medium [J]. Journal of Heat Transfer (Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers), Series C); (United States), 1988, 110:2(2):526-529.
- [29] BERTRAND O, BINET B, COMBEAU H, et al. Melting driven by natural convection A comparison exercise: first results [J]. International Journal of Thermal Sciences, 1999, 38(1): 5-26.
- [30] SETA T, TAKEGOSHI E, OKUI K. Lattice Boltzmann simulation of natural convection in porous media [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2006, 72(2): 195-200.