



中国矿业大学
CHINA UNIVERSITY OF MINING AND TECHNOLOGY



2020级本科生毕业答辩

相变材料蓄冷系统传热强化及能效分析

答辩人： 曲 康 杰
导 师： 梁 林

2024 年 5 月

低碳能源与动力工程学院



目录

- 一 选题背景
- 二 研究方法
- 三 研究内容
- 四 结论



01 选题背景

- 研究现状
- 现有问题

1. LTES: Latent thermal energy storage, 潜热储能



选题背景-研究现状

火电



水电



核电

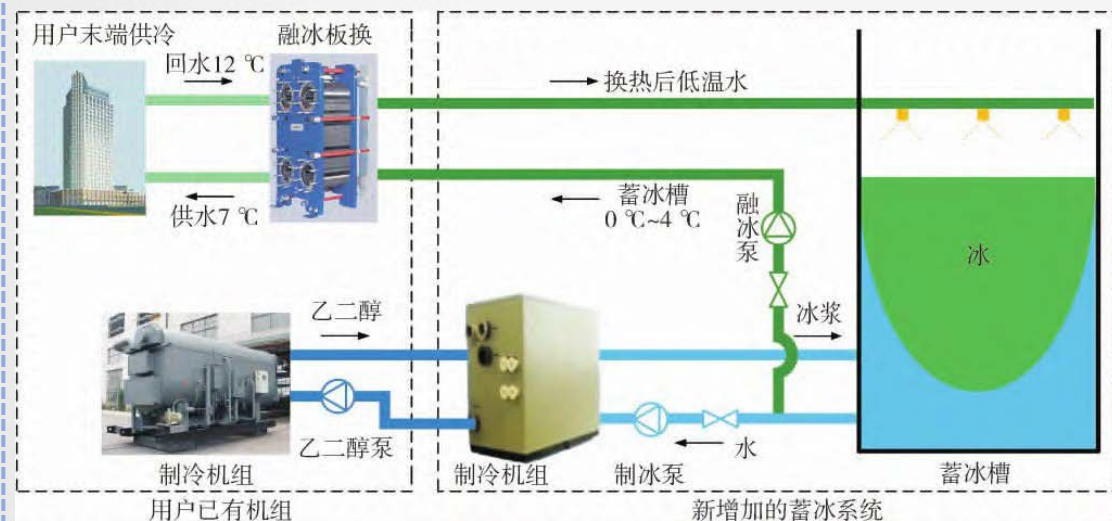


其它



电力供需存在**空间**和**时间**的不匹配

蓄冷技术实现了冷量的**存储**、**运输**和**利用**，起到了“**削峰填谷**”的作用，提高了能源的利用率



相变蓄冷是蓄冷领域研究的
重中之重

强化传热是相变储能研究的
重点之一



常见相变材料物理性质

材料名称	相变温度范围	体积储能密度	导热系数	过冷度	相分离	系统 COP
冰	0°C	较高	中等	无	无	较低
有机材料	5-12°C	较低	较低	无	无	较高
共晶盐材料	5-12°C	中等	较高	存在	存在	较高

有机相变材料具有**高潜热**的特点，相变材料的导热系数对换热效果影响较大，**导热系数过低**制约了有机蓄冷相变的发展。

纳米流体可以有效地提高蓄冷系统的换热性能，现有文献研究，传热性能受到纳米材料**体积分数、材料、粒径、形状**等影响。



02 研究方法

- LBM模型构建
- 物理模型构建

1. LBM: Lattice Boltzmann method, 格子玻尔兹曼方法



尺度选择依据:

1. 该物理问题不关心具体的蓄冷槽结构对熔化的影响
2. 在满足精度需求前提下,降低计算资源压力

引入假设:

1. PCM的物理性质在熔化过程和前后保持不变;
2. 熔化后的PCM为牛顿流体且不可压
3. PCM各向同性,即在各个方向上的物理量相同;



数值模型:

求解表整体元(REV)尺度的格子玻尔兹曼方程

$$f_i(x + \mathbf{e}_i \delta t, t + \delta t) - f_i(x, t) = -\frac{1}{\tau_f} [f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)] + \delta t \mathbf{F}_i$$

$$g_i(x + \mathbf{e}_i \delta t, t + \delta t) - g_i(x, t) = -\frac{1}{\tau_g} [g_i(x, t) - g_i^{eq}(x, t)]$$



Chapman-Enskog展开

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{u} \mathbf{u}}{\varepsilon} \right) = -\frac{1}{\rho} \nabla (\varepsilon p) + \nu_e \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}$$

$$\frac{\partial (H / C_{pl})}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} T) = \nabla \cdot (\alpha_e \nabla T)$$

通过C-E展开返回的不可压宏观控制方程，方程考虑了孔隙率的影响



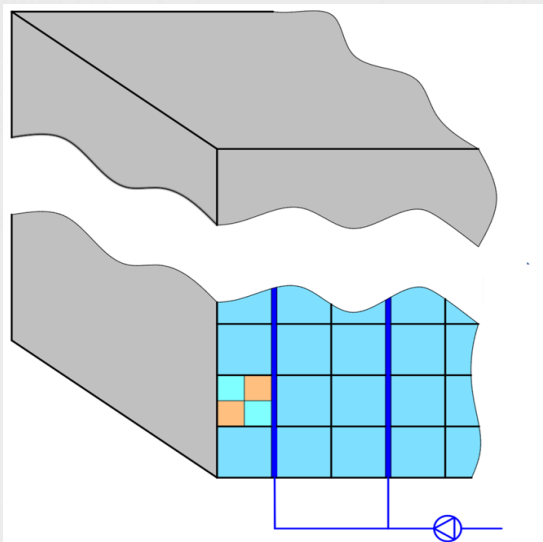
$$\nabla^* \mathbf{u}^* = 0$$

$$\frac{\partial H^*}{\partial t^*} + \sqrt{Ra} \nabla^* \cdot (\mathbf{u}^* T^*) = \nabla^* \cdot (\psi \nabla^* T^*)$$

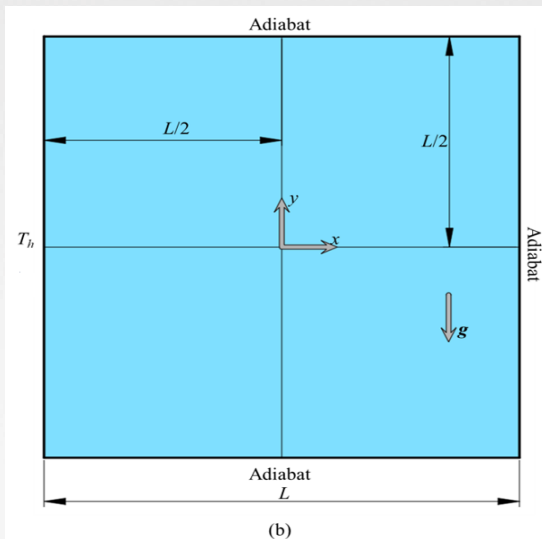
引入无量纲准则数对方程进行无量纲化

$$\frac{1}{Pr} \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial t^*} + \sqrt{\frac{Ra}{Pr}} \nabla^* \cdot \left(\frac{\mathbf{u}^* \mathbf{u}^*}{\varepsilon} \right) = -\nabla^* (\varepsilon p^*) + J \nabla^{*2} \mathbf{u}^* - \varepsilon \mathbf{f}_\varepsilon \sqrt{\frac{Ra}{Da \cdot Pr}} \mathbf{u}^* |\mathbf{u}^*| + \varepsilon \sqrt{\frac{Ra}{Pr}} T^*$$

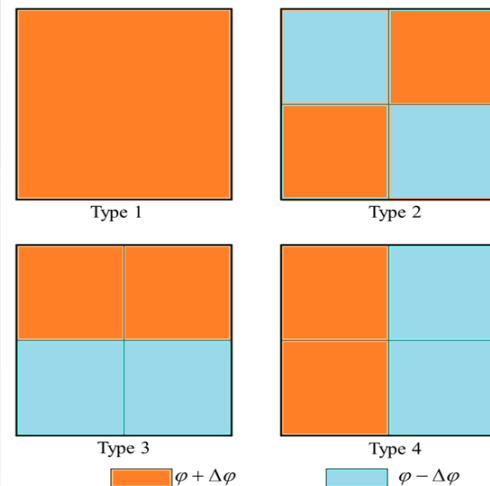
蓄冷槽



壁面加热研究模型



排列方式



计算条件:

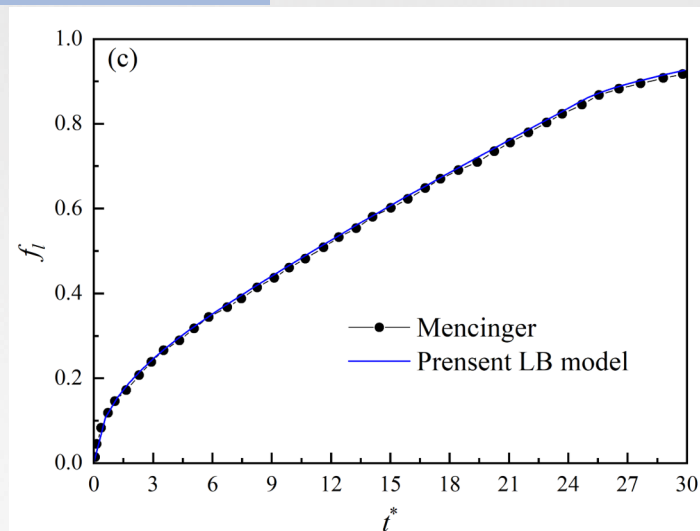
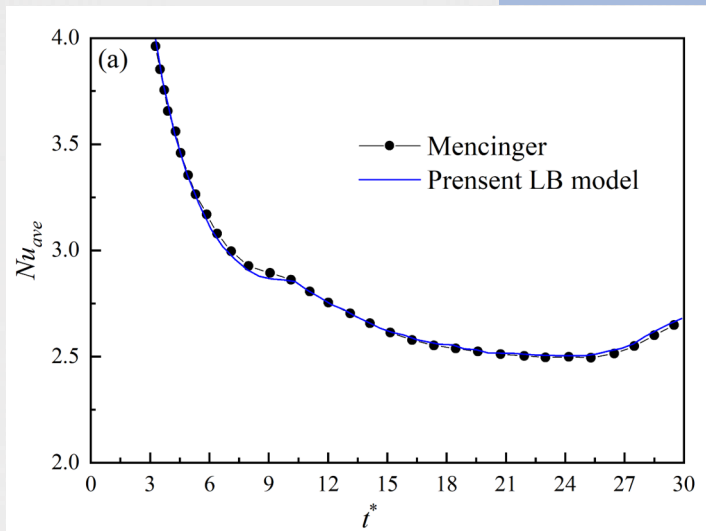
1. 左壁面等温加热，其它三个壁面绝热
2. 研究单元内部填充均匀的纳米相变材料，纳米流体体积分数为 φ
3. 材料初始时为固体，温度保持为 T_0

补充:

1. 研究单元四个区域填充不同体积分数的纳米流体
2. 整个单元保持总潜热不变



参考Mencinger^[1]实验的模型验证



计算条件:

1. 左壁面恒定热流加热，温度为 T_h ，上、下、右壁面绝热
2. 网格大小选取 100×100 ，精确度和资源合适

误差的可能来源:

1. 相变材料的初始温度与环境温度的差别
2. 忽略了石蜡熔化的过热

[1] Mencinger J. Numerical simulation of melting in two-dimensional cavity using adaptive grid [J]. Journal of Computational Physics, 2004, 198(1): 243-64.



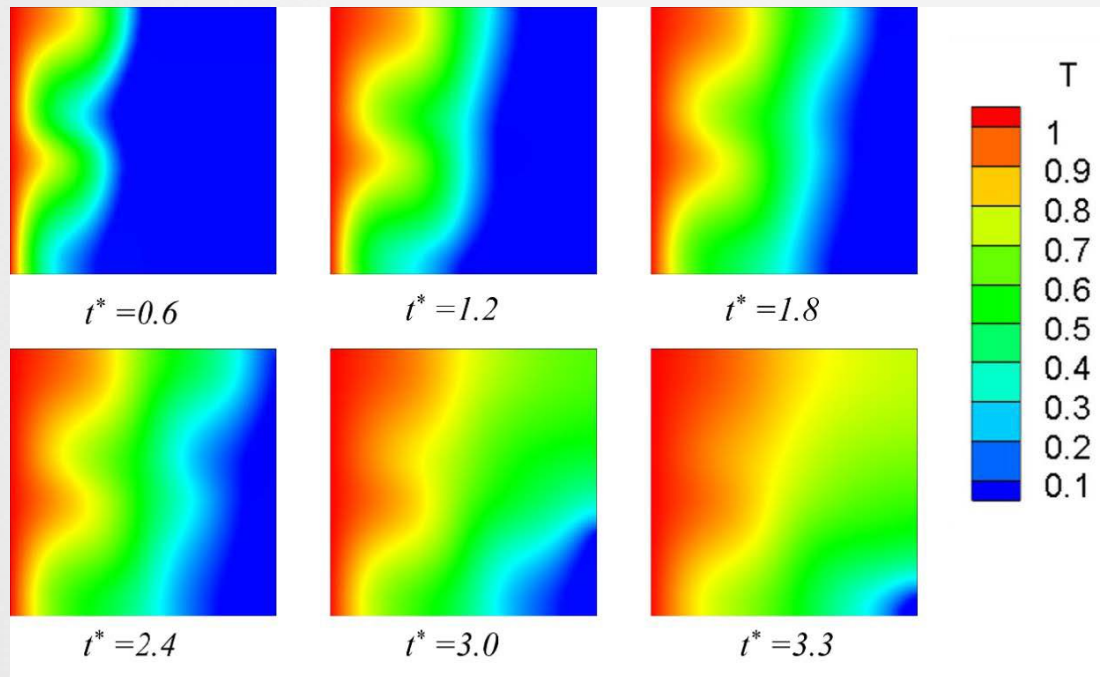
03 研究内容

- 不同瑞利数对模型的影响
- 区域排列方式对模型的影响
- 纳米流体体积分数对模型的影响

计算条件:

1. 瑞利数在 10^3 到 10^6 区间内变化
2. 左壁面恒定热流加热，温度为 T_h ，上、下、右壁面绝热
3. $\varphi = 0.04$, $\Delta\varphi = 0$, $Ste=0.1$
4. 左侧壁面加热，温度 T_h

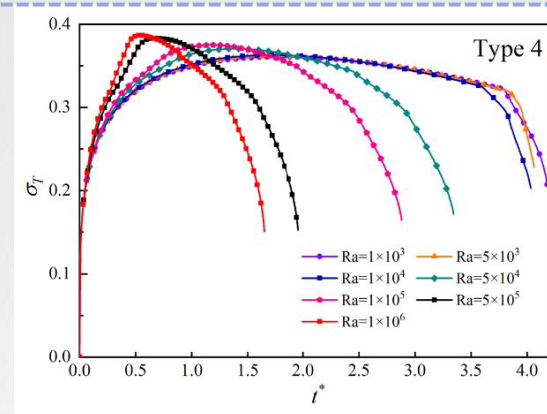
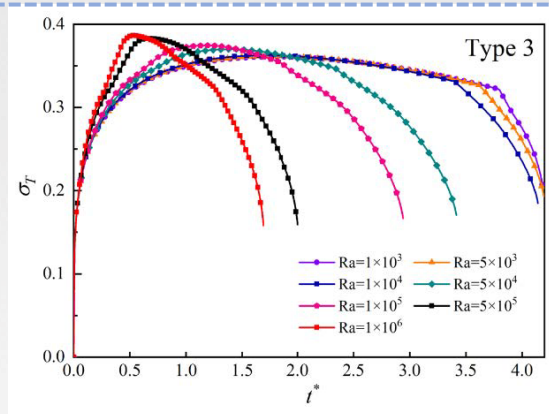
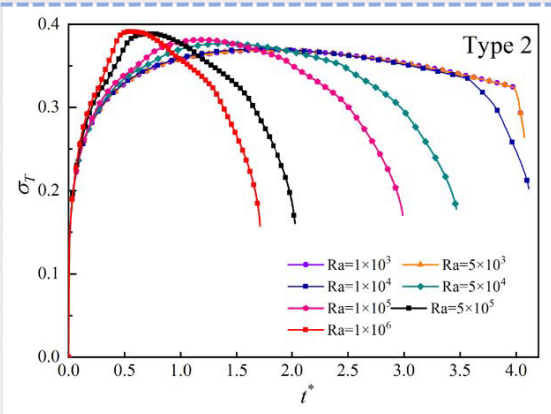
类型1的温度云图



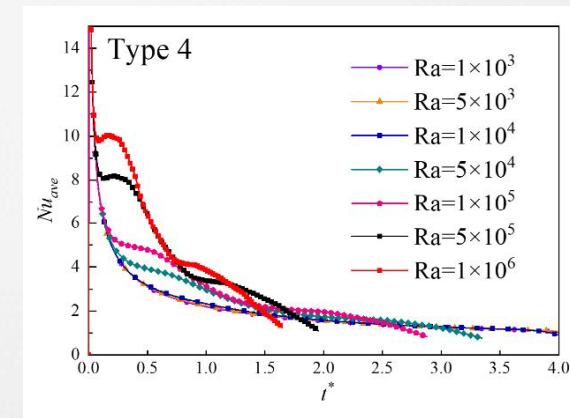
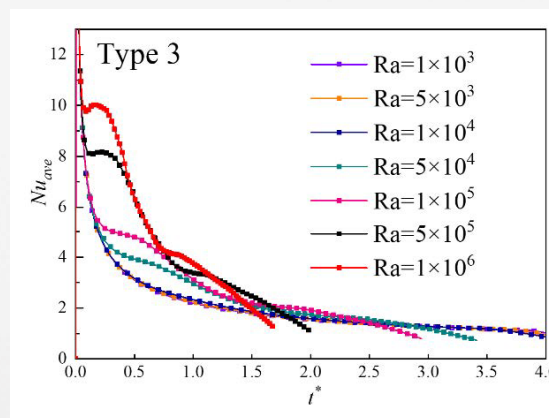
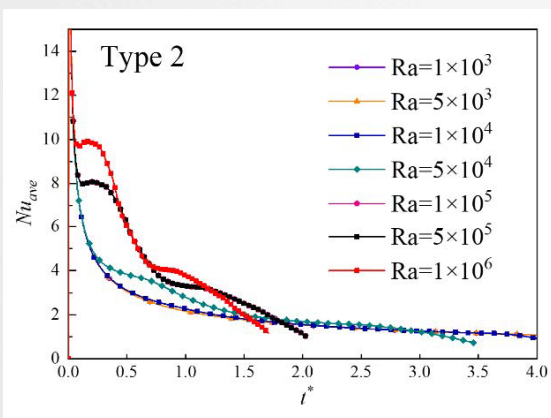
- 左侧两个区域出现顶部快速熔化，下部相对缓慢现象
- 随着时间的推进，温度发生聚集
- 区域顶部材料完全熔化后，向区域右下角移动



不同瑞利数对模型的影响



- 每种类型温度标准差都存在着一个明显的极大值，呈现急剧上升和快速下降两个阶段
- 高瑞利数的温度标准差在短时间内急剧上升，下降的时候也比较快



- 随着瑞利数的增加，加热壁面的平均努塞尔数的增长速率变大



小结:

1. 在加热的过程中，左侧两个区域优先融化，并且区域顶部的熔化速度比下部快。
2. 温度标准差出现了急剧上升和快速下降的两个阶段，存在一个极大值。随着瑞利数的增加，温度标准差上升和下降的速度都加快。
3. 随着瑞利数的增加，左侧壁面的平均努塞尔数增长速率变大，对流换热能力变强。



03 研究内容

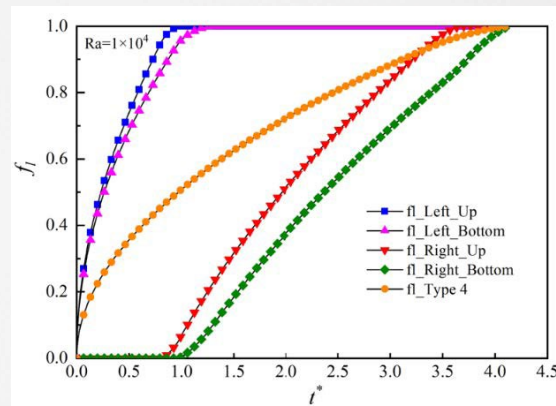
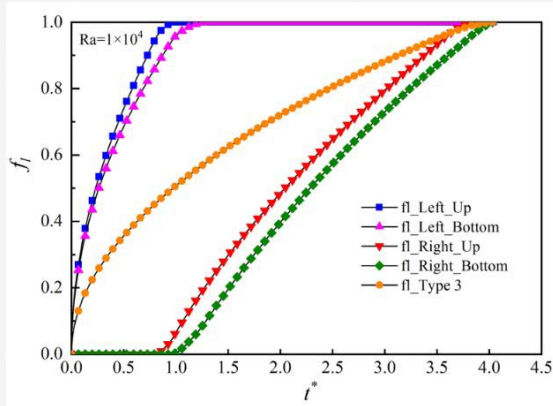
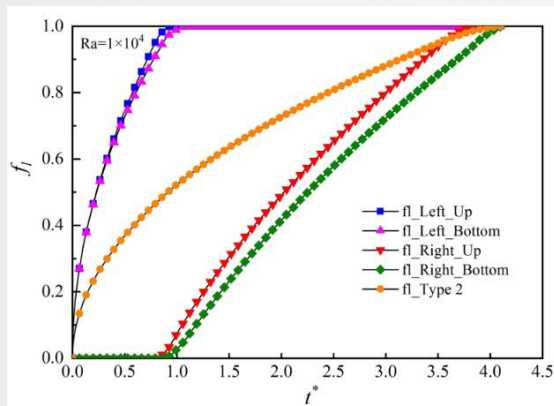
- 不同瑞利数对模型的影响
- 区域排列方式对模型的影响
- 纳米流体体积分数对模型的影响



计算条件:

1. 左壁面恒定热流加热，温度为 T_h ，上、下、右壁面绝热
2. 瑞利数设置为 10^4 ， $\varphi = 0.04$ ， $\Delta\varphi = \pm 0.01$

各区域相变材料的液相率随无量纲时间的

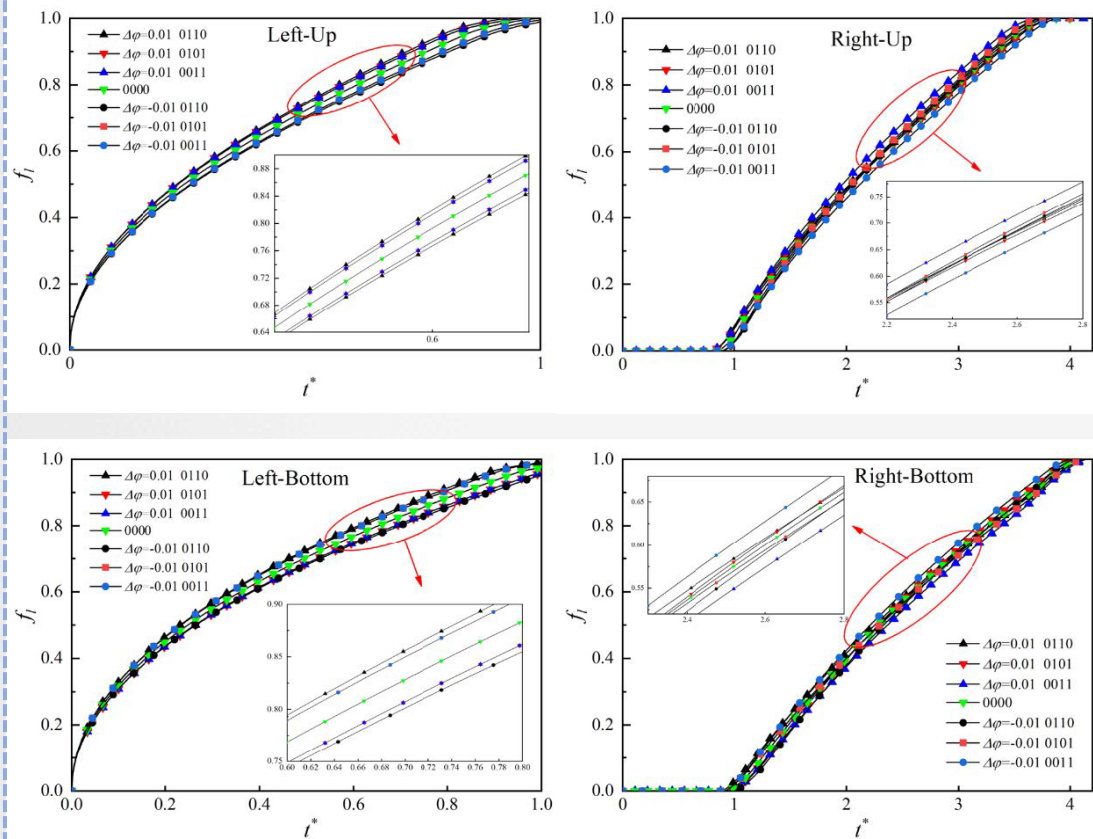


- $\Delta\varphi = 0.01$ 时，左侧两个区域的液相率增加的很快，并且左上区域要比左下区域增加的快
- 右侧两个区域在左侧完全熔化或者几乎完全熔化才会开始熔化，并且右上区域的速度高于右下区域



区域排列方式对模型的影响

各类型相同区域相变材料的液相率随无量纲时间的变化



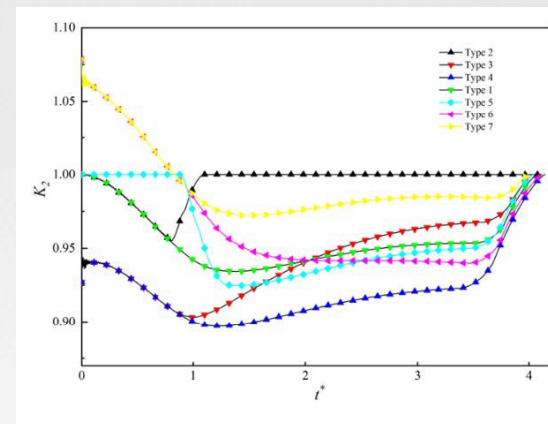
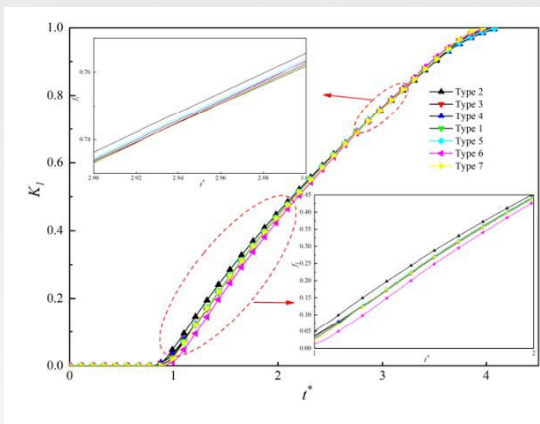
- 当 $\Delta\varphi = 0.01$ 时，左上区域的液相率均大于对照组的， $\Delta\varphi = -0.01$ 的液相率均小于对照组
- 右下区域，类型2、6和7的液相率均大于对照组
- 右上区域，类型4、5和6的液相率均大于对照组
- 右下区域，类型2、3和7的液相率均大于对照组



各类型区域相变材料的液相率的相对比值

$$K_1 = \frac{fl_{Right-Up} + fl_{Right-Bottom}}{fl_{Left-Up} + fl_{Left-Bottom}}$$

$$K_2 = \frac{fl_{Right-Bottom} + fl_{Left-Bottom}}{fl_{Right-Up} + fl_{Left-Up}}$$



- K_1 成增大趋势，研究单元左侧区域快速熔化，液相率很快达到稳定值，此时右侧区域还没开始熔化。随着时间推移，右侧液相率上升
- K_2 呈现先减小后增大的趋势，开始时右侧两部分液相率是0， K_2 主要依赖左侧，由于左上区域熔化较快，故 K_2 下降。随着时间的推进，右上角比右下角先熔化，导致 K_2 下降减缓。
- 类型6和类型7的 K_2 大于1，这是因为在 $\Delta\varphi = -0.01$ 时，左下角的熔化要强烈一些



小结:

1. $\Delta\varphi = 0.01$ 时，左侧两区域先熔化，并且左上角区域要比左下角熔化速度快
2. 不同类型相同区域的液相率随着纳米流体的体积分数不同，呈现的结果不同
3. K_1 成增大趋势， K_2 呈现先减小后增大的趋势



03 研究内容

- 不同瑞利数对模型的影响
- 区域排列方式对模型的影响
- 纳米流体体积分数对模型的影响

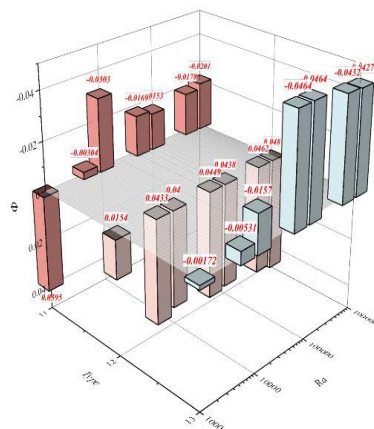
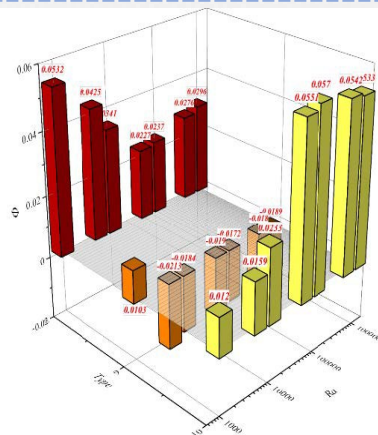
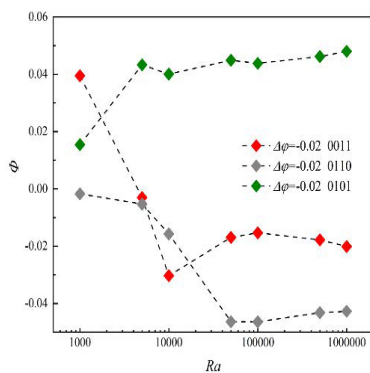
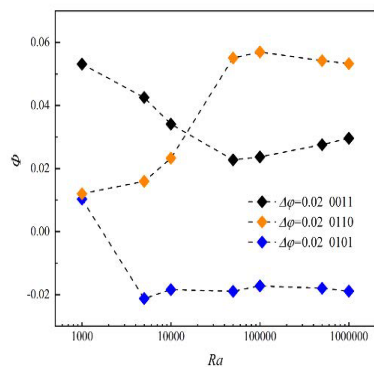


纳米流体体积分分数对模型的影响

计算条件:

1. 左壁面恒定热流加热，温度为 T_h ，上、下、右壁面绝热
2. 瑞利数设置为 10^3 到 10^6 区间变化， $\phi = 0.04$ ， $\Delta\phi = \pm 0.01$ ， $\Delta\phi = \pm 0.02$

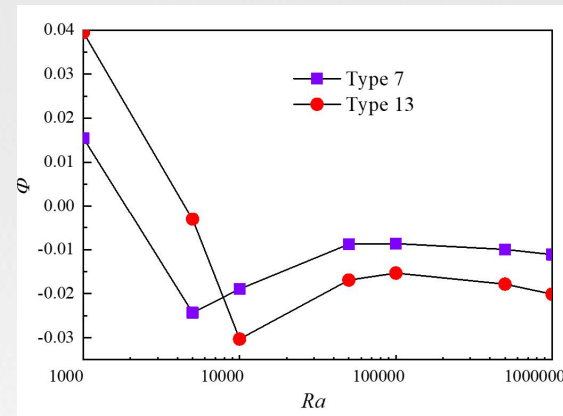
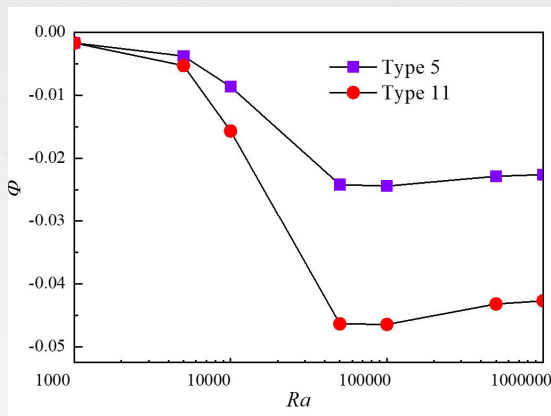
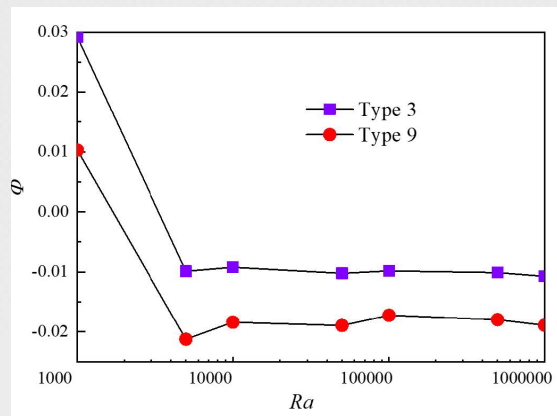
$$\Phi = \frac{t^* - t_0^*}{t_0^*}$$



- 类型9只有在瑞利数为 10^3 的时候， Φ 大于0，大于 10^3 的时候， Φ 小于0
- 类型8和类型10， Φ 都大于0
- 类型11在只有在瑞利数为 10^3 的时候， Φ 大于0
- 类型12， Φ 都大于0



纳米流体体积分数对模型的影响



- 类型9的 ϕ 始终小于类型3的
- 在瑞利数为 10^3 之前，类型11的 ϕ 大于类型5的，但是后面一旦瑞利数变大，此时类型11的 ϕ 就会小于类型5的
- 在瑞利数处于 10^4 之前，类型13的 ϕ 同样大于类型7的，但是在瑞利数大于 10^4 的后面，还是类型13要小于类型7的。
- 当 $\Delta\phi = 0.02$ 情况下，研究单元中纳米相变材料实现完全熔化所需要的时间小于 $\Delta\phi = 0.01$ 情况下的完全熔化时间



小结:

1. 同一类型，随着瑞利数的增加，相对熔化时间逐渐减小
2. 排列方式的不同，其相对熔化时间也有所差异
3. 总体而言 $\Delta\varphi = 0.02$ 的要比 $\Delta\varphi = 0.01$ 要优秀



04 总结

- 总结



总结:

1. 针对瑞利数对蓄冷系统的影响，对本文的不同类型分布进行对纳米相变材料熔化现象研究。结果表明瑞利数越大，各类型分布纳米相变材料熔化速度越快，蓄冷系统传热能力越强。
2. 针对纳米颗粒的排列方式对蓄冷系统的影响，分别分析一个类型内各个区域和不同类型间相同区域的不同体积分数纳米颗粒对材料熔化速率的影响。结果表明左上角区域的纳米相变材料对流换热能力要比左下角区域的强烈，可以通过合理减少左下区域的纳米颗粒体积分数来增强对流换热强度，从而增加整体的熔化速率。
3. 针对体积分数对蓄冷系统的影响，分析更多纳米颗粒体积分数对熔化速率的情况。结果表明相比于单元左下方区域，合理增加左上方纳米颗粒的体积分数，对熔化速率有促进作用，并且两者的差异越大，效果越好。



感谢各位答辩委员耐心指导与指正！

感谢梁林老师悉心教诲！

感谢中国矿业大学低碳能源与动力工程学院的培养！