

Simulation of Molten Salt Thermocline Thermal Energy Storage under Local Thermal Non-equilibrium Condition

Zuo Yuanzhi¹, Yang Xiaoxi², Ding Jing³

¹Key Lab. of Enhanced Heat Transfer & Energy Conservation of MOE, South China University of Technology, Guangzhou, China

²Guangdong Provincial Key Lab of Distributed Energy System, Dongguan University of Technology, Dongguan, China

³School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, China

Email: zuoyz@dgut.edu.cn, xxyang@dgut.edu.cn, cejing@scut.edu.cn

Abstract: The molten salt thermocline thermal energy storage (TES) will offer a promise high-temperature TES technology for the concentrating solar power system. Based on the local thermal non-equilibrium (LTNE) assumption, the heat transfer and heat storage LTNE simulation model of the single-phase flow through porous media in the molten salt thermocline system is provided, and the influences of the characteristic parameters of the molten salt and porous media on the TES performance are analyzed through adopting Matlab software, and the precondition of applying the local thermal equilibrium (LTE) assumption is obtained. The result shows if the equivalent particle diameter of porous media is not greater than 0.004mm or the thermal conductivity of molten salt and porous media are in the same order of magnitude, it is valid to apply the LTE model for calculating the heat transfer in porous media. The heat storage and heat transfer characteristics of the single-phase flow through porous media in the molten salt thermocline TES system are revealed, which will provide an important basis for the design and operation control of the molten salt high temperature thermocline system.

Keywords: concentrating solar power; molten salt materials; porous media; thermocline thermal energy storage; local thermal non-equilibrium

基于局部非热平衡的熔融盐斜温层蓄热的数值模拟

左远志¹, 杨晓西², 丁 静³

¹华南理工大学传热强化与过程节能教育部重点实验室, 广州, 中国, 510640

²东莞理工学院广东省分布式能源系统重点实验室, 东莞, 中国, 523808

³中山大学工学院, 广州, 中国, 510006

Email: zuoyz@dgut.edu.cn, xxyang@dgut.edu.cn, cejing@scut.edu.cn

摘 要: 熔融盐斜温层蓄热是太阳能热发电系统中一种具有潜在应用前景的高温蓄热技术。基于多孔介质局部非热平衡理论, 建立了多孔介质中熔融盐流体斜温层蓄热的局部非热平衡数值模拟模型。采用Matlab软件编程求解, 分析了熔融盐与多孔介质的特性参数对多孔介质中熔融盐传热性能的影响, 得到了应用局部热平衡假设的前提条件。结果表明: 当颗粒平均当量直径 $d_p \leq 0.004\text{mm}$ 时或者熔融盐与多孔介质填料的导热系数为同一数量级时, 可以采用局部热平衡模型。揭示了多孔介质中熔融盐流体斜温层蓄热系统的蓄热特性, 为熔融盐高温斜温层蓄热器的设计和运行控制提供了依据。

关键词: 太阳能热发电; 熔融盐材料; 多孔介质; 斜温层蓄热; 局部非热平衡

1 引言

由于太阳辐射地表的能量具有间歇性和不稳定

性, 发展高效蓄热技术(thermal energy storage, TES), 强化热能器件能量转换效率和存储密度, 以有效地解决太阳能的转换、储存与输运问题成为太阳能热发电系统中的关键技术之一^[1-2]。Sandia 国家实验室的James 等^[3]为了降低双罐熔融盐蓄热装置的固定投资

资助信息: 国家自然科学基金重点项目(50930007); 东莞市科技计划项目(No. 2007108101016)

成本,设计并测试了一个 2.3 MW·h 的斜温层单罐蓄热系统。Brosseau 等^[4]采用三元熔融盐 (Hitec XL) 做热循环与等温实验,证实了熔融盐与多孔介质填料的相容性问题。这些研究表明,熔融盐斜温层蓄热是一种具有潜在应用前景的高温蓄热技术。蓄热单罐内存在大温差斜温层多孔介质中对流换热过程,其流动和换热特性规律研究是提高其能量储存与交换效率的重要途径。就单相流体在多孔介质中受迫对流换热而言,存在两种不同的数学模型:局部热平衡模型和局部非热平衡模型。采用局部热平衡模型的有效性,目前仍没有统一的判据。Amiri 等人^[5]较早评价模型的有效性,认为 Da 数、 Re_p 与热扩散率比 a_R ($a_R = a_f/a_s$) 是重要评价指标,并给出了对应的诺模图。Marafie 等人^[6]却认为,流-固导热系数比 λ_R ($\lambda_R = \lambda_f/\lambda_s$) 与 Bi 数对模型的有效性的影响更为明显, Da 数与其它物性参数的影响并不明显。Jiang 等人^[7]的研究表明:当流体和固体骨架的导热系数接近时,用局部热平衡模型来计算多孔介质中的换热是有效的,当二者相差较大时,用局部非热平衡模型更为有效。Minkowycz 等人^[8]认为对于瞬态强化对流换热,大多数情况采用局部

热平衡模型是合理的,而 S_p 数/ Re 数的比值是判断模型有效性的直接依据。为此,本文通过建立多孔介质中熔融盐流体斜温层蓄热的局部非热平衡数值模拟模型,来分析其应用局部热平衡假设的前提条件。

2 数值模型

2.1 物理模型

多孔介质中熔融盐流体斜温层蓄热单罐的传热计

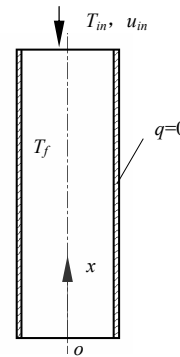


Figure 1. Model of the thermocline TES tank
图 1 蓄热单罐的计算模型

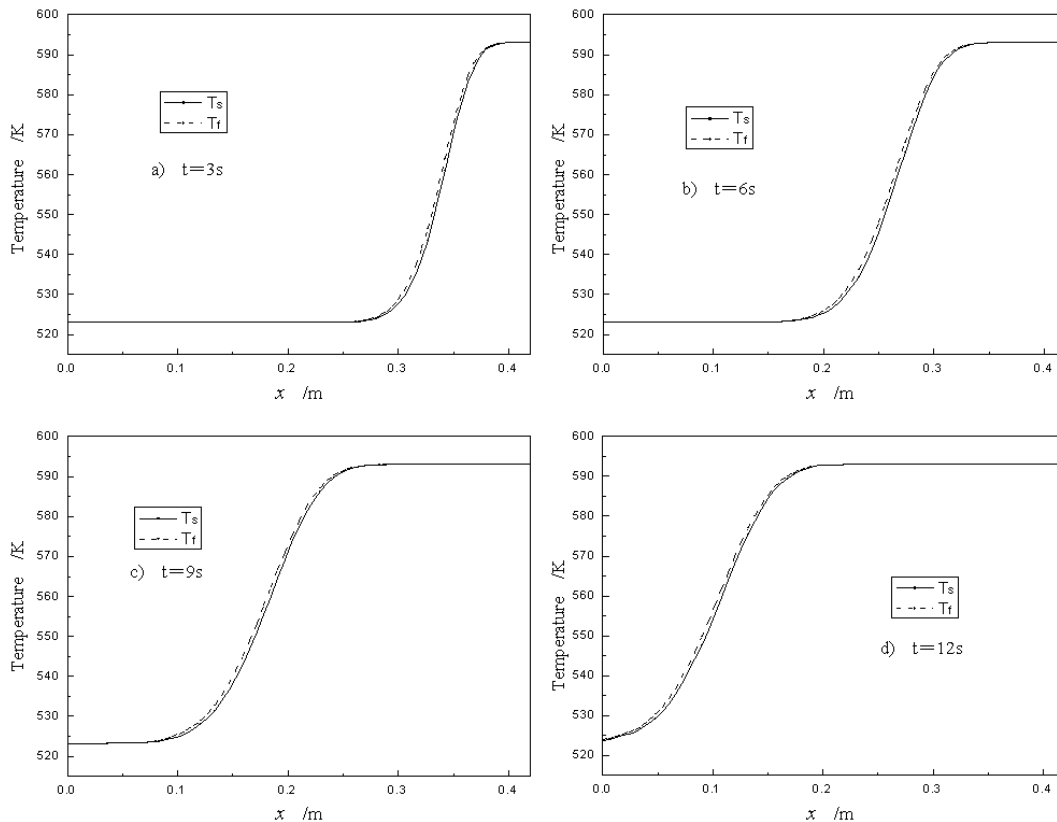


Figure 2. Temperature profiles along the axis at different moments of the charge process
图 2 蓄热过程中不同时刻轴向温度分布

算模型如图 1 所示。罐内存在温度为 T_f 的低温熔融盐流体与多孔介质填料，在初始时刻 $t = 0$ 开始，温度为 T_{in} ，速度为 u_{in} 的均匀高温熔融盐流体从上端进入，低温熔融盐流体从底端流出，此为蓄热过程。假定：①多孔介质各向同性；②无内热源；③罐壁为绝热边界；④忽略熔融盐与多孔介质的单位体积热容量及热系数随温度的变化。同时根据局部热平衡模型模拟流速比较低的情况下的模拟结果，接近一维流动，为了简化计算，这里采用一维局部非热平衡模型。设 x 为流动主流方向，根据上述假设，文献[5]的局部非热平衡模型可简化为：

$$(1-\varphi)(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-\varphi)\lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + h_{sf} a_{sf} (T_f - T_s) \quad (1)$$

$$\varphi(\rho c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c_p)_f u_D \frac{\partial T_f}{\partial x} = \lambda_{eff} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + h_{sf} a_{sf} (T_s - T_f) \quad (2)$$

式(1)与式(2)也称为流固耦合的“双能量方程”。在流体的能量方程中仍考虑了对流项 $(\rho c_p)_f u_D \frac{\partial T_f}{\partial x}$ ，表示由于流体的对流流动而传递的热量，并通过 λ_{eff} 考虑了热弥散效应。其中， h_{sf} 、 a_{sf} 与 λ_{eff} 分别如下推荐公式^[5,9]：

$$a_{sf} = \frac{6(1-\varphi)}{d_p} \quad (3)$$

$$h_{sf} = \lambda_f \left[2 + 1.1 Pr^{1/3} \left(\frac{\rho u_D d_p}{\mu} \right)^{0.6} \right] / d_p \quad (4)$$

$$\lambda_{eff} = \varphi \lambda_f + 0.5 \left[Pr \left(\frac{\rho u_D d_p}{\mu} \right) \right] \lambda_f \quad (5)$$

初始条件为：

$$T_f(x, 0) = T_0, \quad T_s(x, 0) = T_0 \quad (0 \leq x \leq L) \quad (6)$$

边界条件为：

$$T_f(0, t) = T_{in}, \quad T_s(0, t) = T_{in} \quad (t > 0) \quad (7)$$

2.2 数值计算方法

采用 Matlab 编程求解流固耦合的“双能量方程”。时间离散采用向后 Euler 差分。对流项采用迎风型一阶差分，扩散项采用二阶中心差分。

3 模拟结果与分析

3.1 瞬态传热特性

已知参数如下：流体介质为熔融盐，多孔介质为

石英岩；单位体积热容量为 $(\rho c)_s = 3501 \text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ， $(\rho c)_f = 2808 \text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ；导热系数为 $\lambda_s = 0.0041 \text{kW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ， $\lambda_f = 0.00055 \text{kW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；孔隙率为 $\varphi = 0.4$ ，颗粒平均当量直径为 $d_p = 0.002 \text{m}$ ； $L = 0.002 \text{m}$ ；初始温度为 $T_0 = 523 \text{K}$ ，进口温度为 $T_{in} = 593 \text{K}$ ；进口速度为 $u_D = 0.03 \text{m/s}$ 。可得到蓄热过程中流体介质温度 T_f 与多孔介质温度 T_s 随时间的变化关系。图 2 为蓄热过程中 T_f 与 T_s 不同时刻轴向上的温度分布，图 3 为相应的温度差 $(T_f - T_s)$ 沿轴向的变化值。由图可知， T_f 与 T_s 之间存在温度差，从数据上看，温度差的分布几乎存在于整个轴线位置，但在斜温层段表现非常明显，随着时间的推移，极限温度差略有减少。

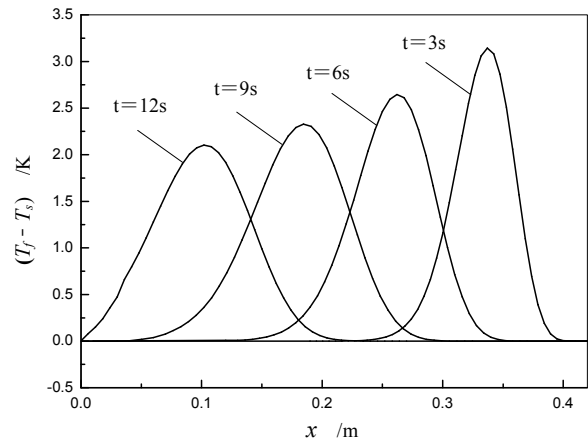


Figure 3. Temperature difference $(T_f - T_s)$ along the axis at different moments of the charge process

图 3 蓄热过程中不同时刻轴向上的温度差 $(T_f - T_s)$

文献[10]对局部非热平衡有如下解释，当 $|\theta_s - \theta_f| \geq 0.05$ 时（其中 θ 为无量纲温度， $\theta = \frac{T - T_{in}}{T_w - T_{in}}$ ），可认为属于局部非热平衡的范畴，且当长径比 $\frac{l}{d} < 10$ 时，该约束条件可以适当放宽。因此，通过图 3 可以计算得到，在整个轴线高度区间， $\left| \frac{T_f - T_s}{T_{in} - T_0} \right| < 0.05$ ，这表明在熔融盐与石英岩多孔介质配对的情况下， T_f 与 T_s 之间的温度差可以忽略不计，因此采用多孔介质局部热平衡模型来计算熔融盐与石英岩多孔介质填料之间的换热是相对有效的。

3.2 多孔介质颗粒平均当量直径对模型有效性的影响

在 3.1 节所提供的已知模拟参数中，仅改变多孔

介质的颗粒平均当量直径 d_p ，可得到当蓄热进程 $t = 3s$ 时，不同的 d_p 对温度差 $(T_f - T_s)$ 的影响，如图 4 所示。可见，随着 d_p 的增大，温度差 $(T_f - T_s)$ 增加比较明显，这是因为 d_p 对比表面积 a_{sf} 与两相间面积对流换热系数 h_{sf} 的影响比较大。当 $d_p = 0.004mm$ 时，

$$\max \frac{|T_f - T_s|}{|T_{in} - T_0|} = 0.0703, \text{ 可以判断为局部非热平衡, 但}$$

根据短管条件（长径比 $\frac{l}{d} < 10$ ），仍可以采用局部热平衡假设。但当 $d_p = 0.006mm$ 时，再采用局部热平衡假设将会不合适。

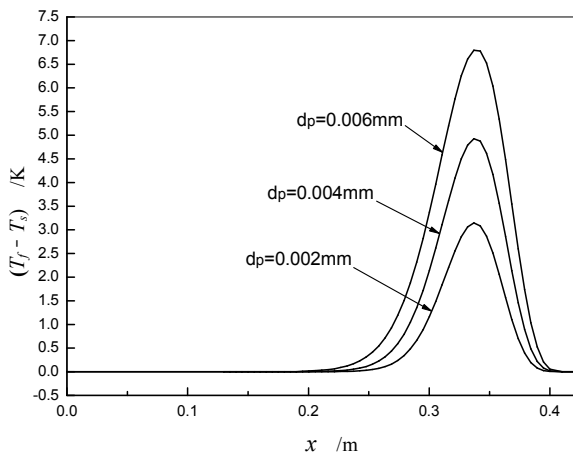


Figure 4. Influence of different equivalent particle diameter of porous media d_p on temperature difference $(T_f - T_s)$
图 4 不同颗粒平均当量直径 d_p 对温度差 $(T_f - T_s)$ 的影响

3.3 多孔介质导热系数对模型有效性的影响

在 3.1 节所提供的模拟已知参数中，仅是改变多孔介质的导热系数 λ_s ，可得到在时间进程 $t = 3s$ 时，不同的 λ_s 对温度差 $(T_f - T_s)$ 的影响，如图 5 所示。可见，当多孔介质的导热系数 λ_s 大于熔融盐流体介质的 λ_f 时，均能满足

$$\frac{|T_f - T_s|}{|T_{in} - T_0|} < 0.05; \text{ 当 } \lambda_s = 0.2\lambda_f \text{ 时}$$

$$\max \frac{|T_f - T_s|}{|T_{in} - T_0|} = 0.056, \text{ 仍基本可以采用局部热平衡假}$$

设。因此，在上述模拟条件下，当熔融盐与多孔介质的导热系数为同一数量级时，采用多孔介质局部热平衡模型来计算流体与多孔介质之间的换热是合理的，这与文献[7]的结论基本一致。三元熔融盐与硅质粗沙、石英岩、陶瓷等组成的多孔介质蓄热是目前比较看好的熔融盐-多孔介质配对，而其导热系数较好地满足处在同一数量级的条件，因此，采用结合 FLUENT 软件的局部热平衡模型来研究熔融盐斜温层蓄热的传热特性不仅合理，而且便利。

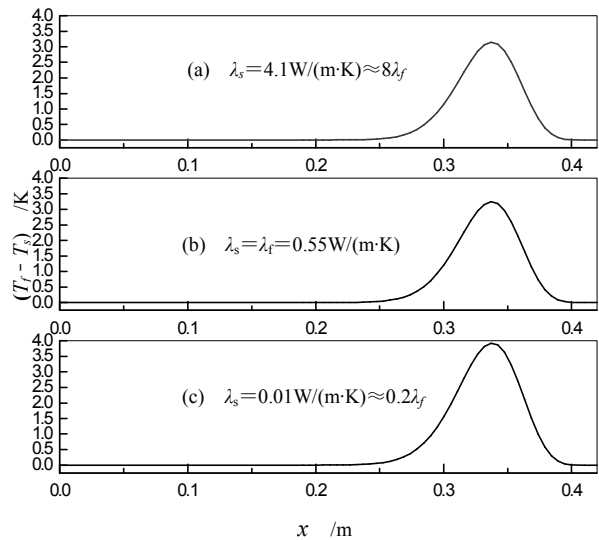


Figure 5. Influence of different thermal conductivity λ_s on temperature difference $(T_f - T_s)$
图 5 不同导热系数 λ_s 对温度差 $(T_f - T_s)$ 的影响

4 结论

1) 蓄热过程中熔融盐流体介质温度 T_f 与多孔介质温度 T_s 温度差 $(T_f - T_s)$ 的分布存在于整个轴线位置，在斜温层段表现非常明显。

2) 多孔介质的颗粒平均当量直径 d_p 与导热系数 λ_s 等参数对是否采用局部热平衡假设有较大影响。当颗粒平均当量直径 $d_p \leq 0.004mm$ 时或者熔融盐与多孔介质的导热系数为同一数量级时，可以采用局部热平衡模型。也即表明，通常采用多孔介质局部热平衡模型来计算多孔介质中熔融盐流体斜温层蓄热的传热是有效合理的。

References (参考文献)

- [1] Kearney D, Herrmann U, Nava P, et al. Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field [J]. *Journal of solar energy engineering*, 2003, 125(2): 170-176.
- [2] Herrmann U, Kelly B, Price H, et al. Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants [J]. *Energy*, 2004, 29(6): 883-893.
- [3] James E P, Steven K S, Kolb W J, et al. Development of a molten-salt thermocline thermal storage system for parabolic trough plants[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2002, (124): 153-159.
- [4] Brosseau D, Kelton J W, Ray D, et al. Testing of thermocline filler materials and molten-salt heat transfer fluids for thermal energy storage systems in parabolic trough plants[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2005, (127): 109-116.
- [5] Amiri A, Vafai K. Analysis of dispersion effects and non-thermal equilibrium, non-Darcian, variable porosity incompressible flow through porous media [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1994, 37(6): 939-954.
- [6] Marafie A, Vafai K. Analysis of non-Darcian effects on tem-

- perature differentials in porous media[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(23): 4401-4411.
- [7] Jiang P X, Ren Z P. Numerical simulation of forced Convection heat transfer in porous plate channels using thermal equilibrium or non-thermal equilibrium models [J]. *Numerical heat transfer: Part A Applications*, 1998, 35(1): 99-113.
- [8] Minkowycz W J, Haji-Sheikh A, Vafai K. On departure from local thermal equilibrium in porous media due to a rapidly changing heat source: the Sparrow number [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999(42): 3373-3385.
- [9] Vafai K, Sözen M. Analysis of energy and momentum transport for fluid flow through a porous bed [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1990(112): 690-699.
- [10] Khashan S A, Al-Amiria A M, Al-Nimr M A. Assessment of the local thermal non-equilibrium condition in developing forced convection flows through fluid-saturated porous tubes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005(25): 1429-1445.