

单罐储热技术

白凤武

中国科学院电工研究所

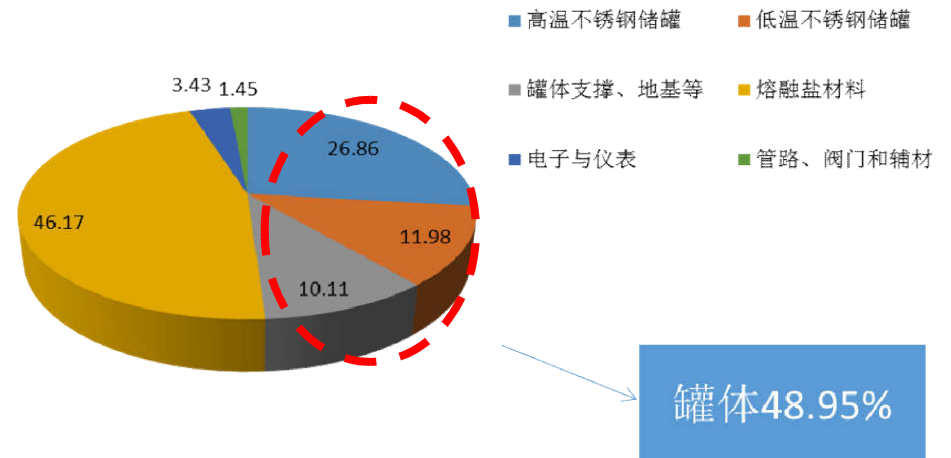
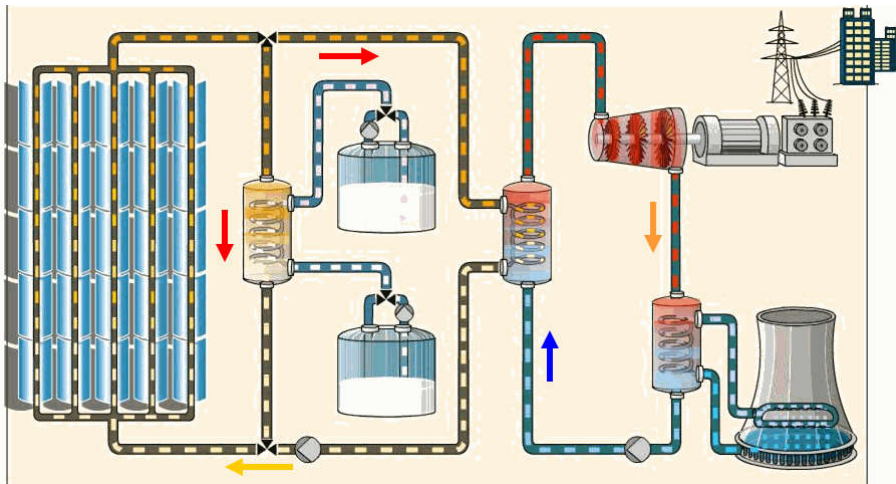
2018年6月27日



单罐储热技术

为什么要单罐储热？

双罐储热中有接近一个罐的容积未被充分利用，而罐体成本占比较高。



单罐储热技术

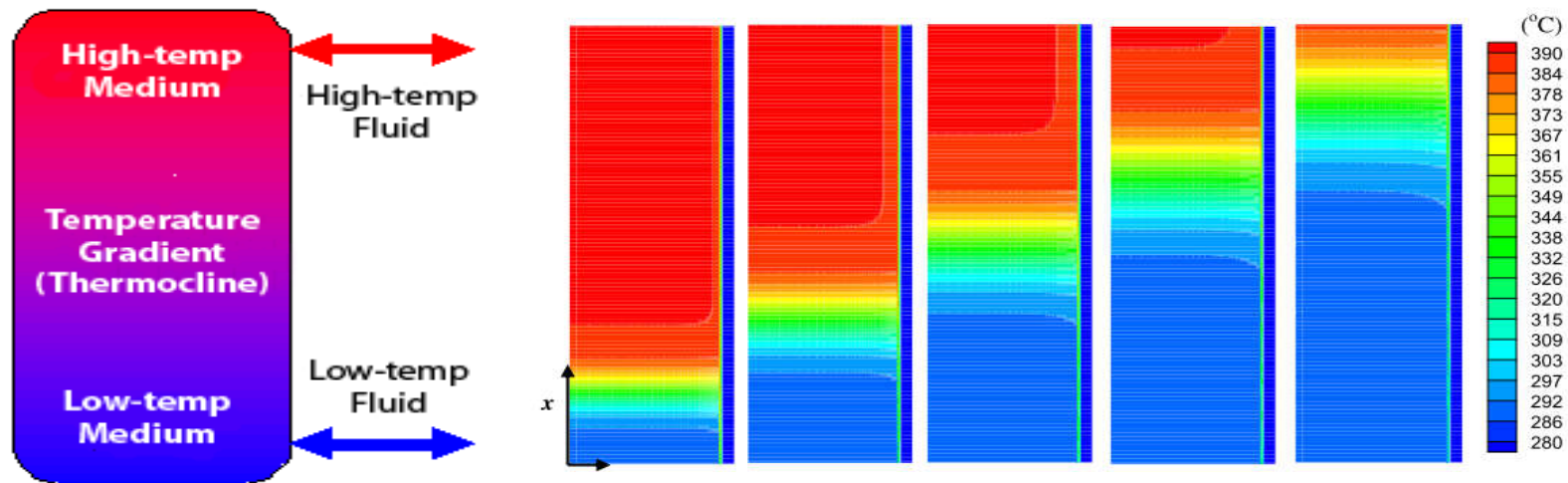
单罐储热是否可行？

液体可以在条件允许的情况下实现温度分层，可以实现冷热流体共同保存在一个容器中。
为了降低液体储热材料的用量，还可以添加一些低成本固体储热材料。

定义：**Thermocline**

温跃层，温度突变层（较热的水面区与冷的深冷水区之间的水层）；

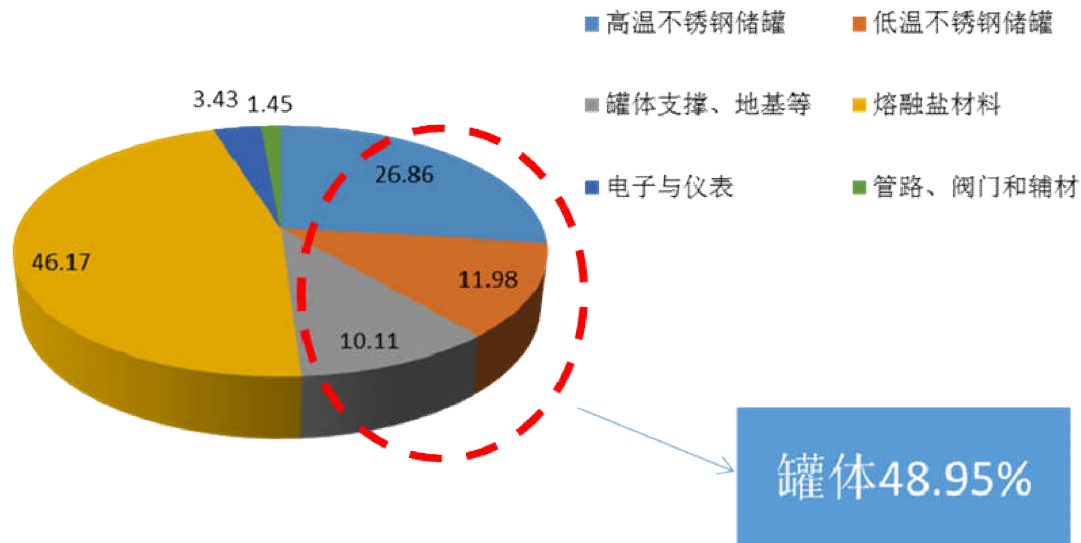
斜温层（**Thermocline**）是大体积流体（即，水，如海洋或湖，或空气，如大气）内，一层很明显的薄层。在这层内的温度随深度变化较在这层之上或下层的温度变化都快。



单罐储热技术

单罐储热是否有优势？

成本优势：减少一个储罐后，总体成本可以降低30%。



单罐储热技术

单罐储热是否有应用？

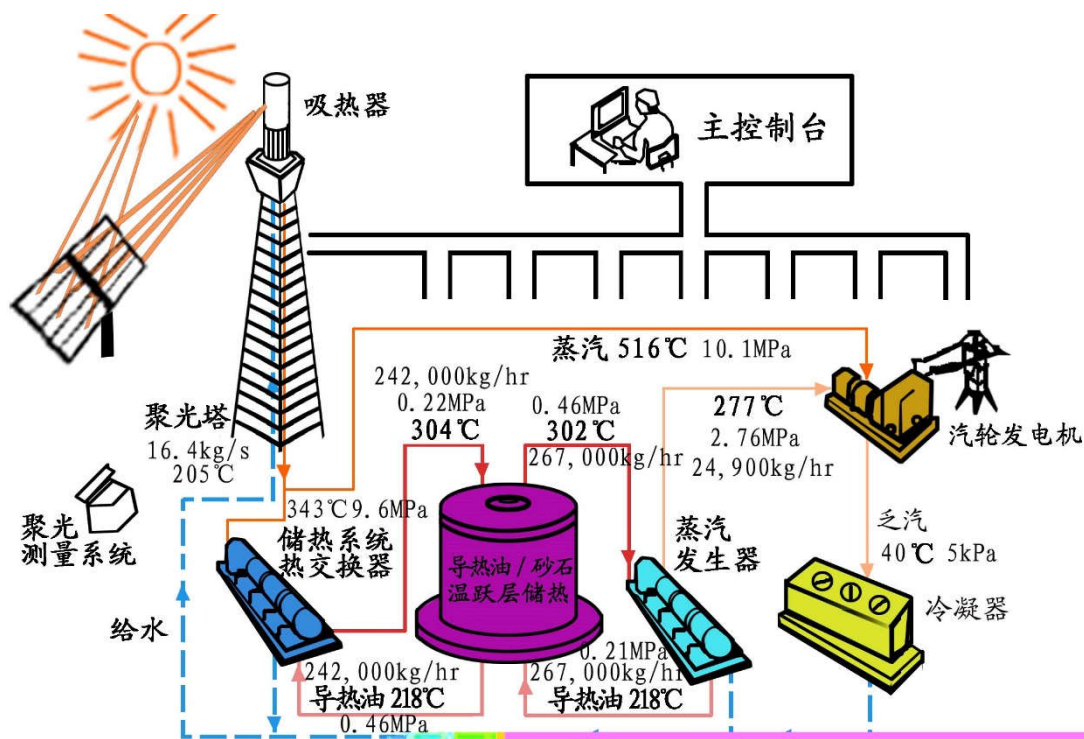
美国Solar One电站10MWe

单罐温跃层（斜温层）蓄热：**3460m³**，
182MWh_t，**7MWe**汽轮机发**4**小时
高温导热油和沙石

效果不佳，未能推广。

主要问题：

- (1) 运行过程控制困难
- (2) 斜温层保持难度大



需要深入、细致的技术研究

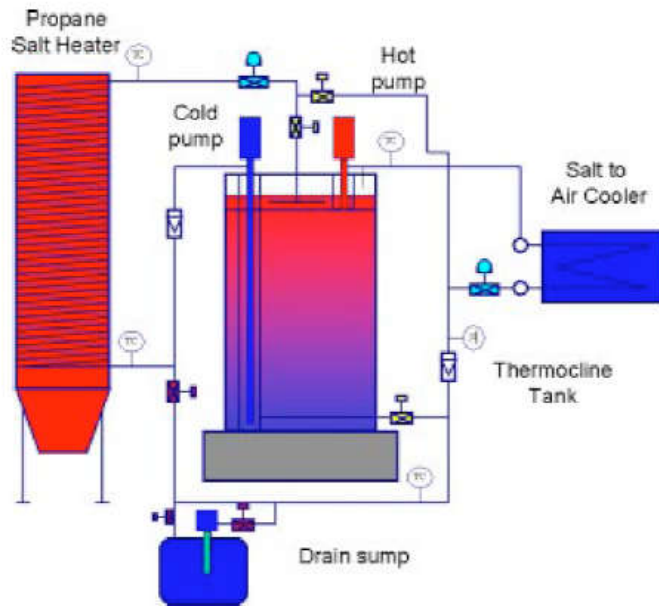


单罐储热技术

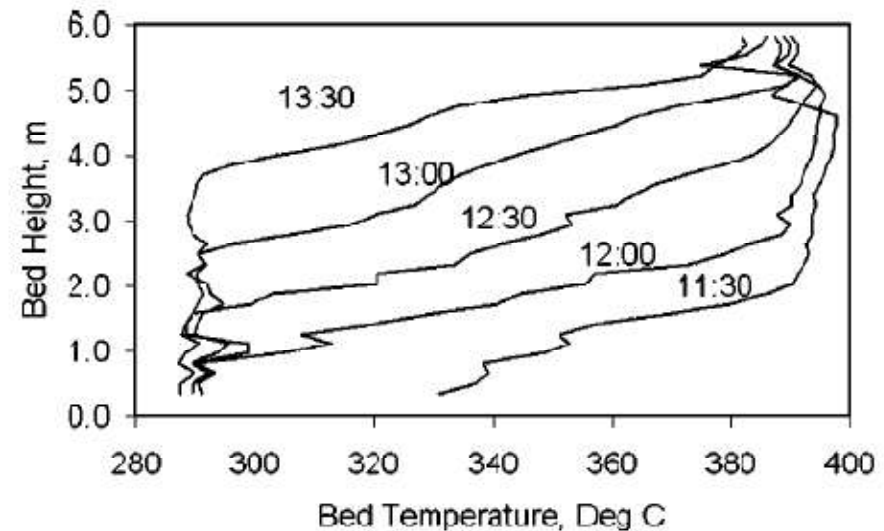
实验研究

石英岩和沙子为填充物，孔隙率0.22；碳钢罐，高6.1 m，直径 3.0 m，熔融盐为传热流体，2.3MWth储热量

实验系统



放热过程



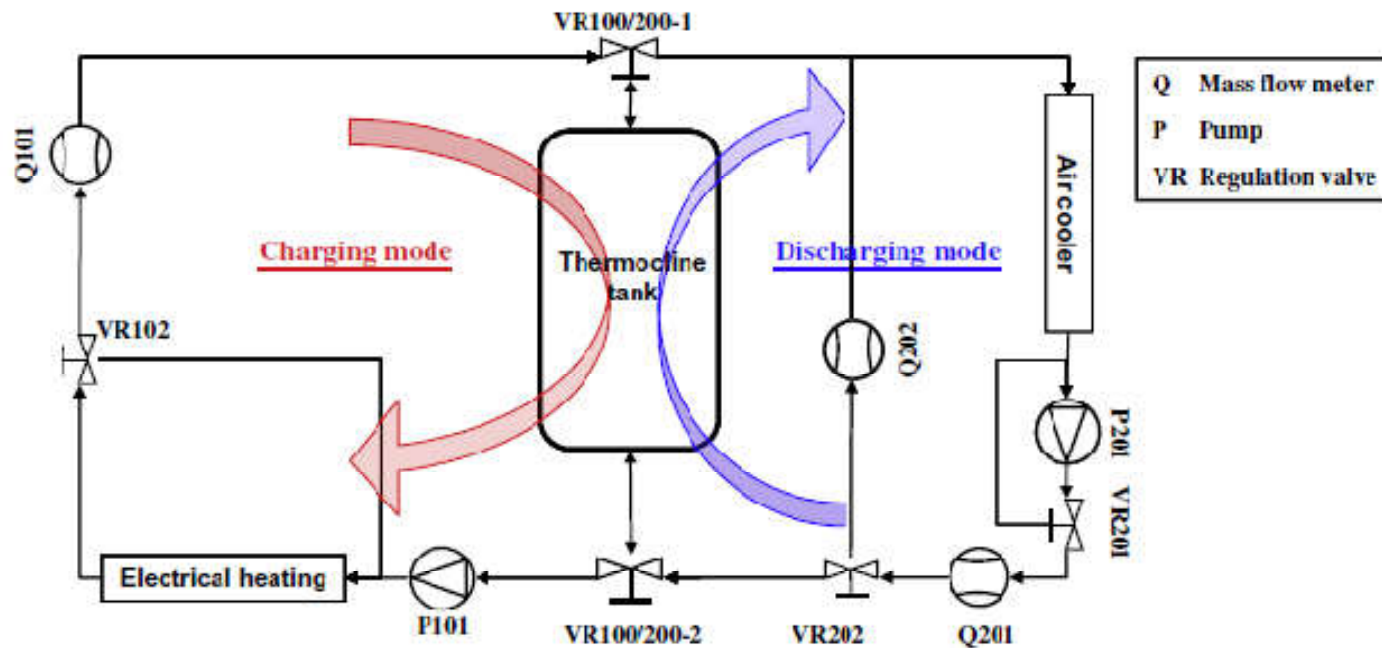
J.E. Pacheco, S.K. Showalter, W.J. Kolb, Development of a molten-salt thermocline thermal storage system for parabolic trough plants, Journal of Solar Energy Engineering 124 (2002) 153-159.

单罐储热技术

实验研究

20%沙子（3mm大）+80%石子（30mm大）为填充物，孔隙率0.27；不锈钢罐，高3 m，直径1 m。350℃的导热油为传热流体。

实验系统



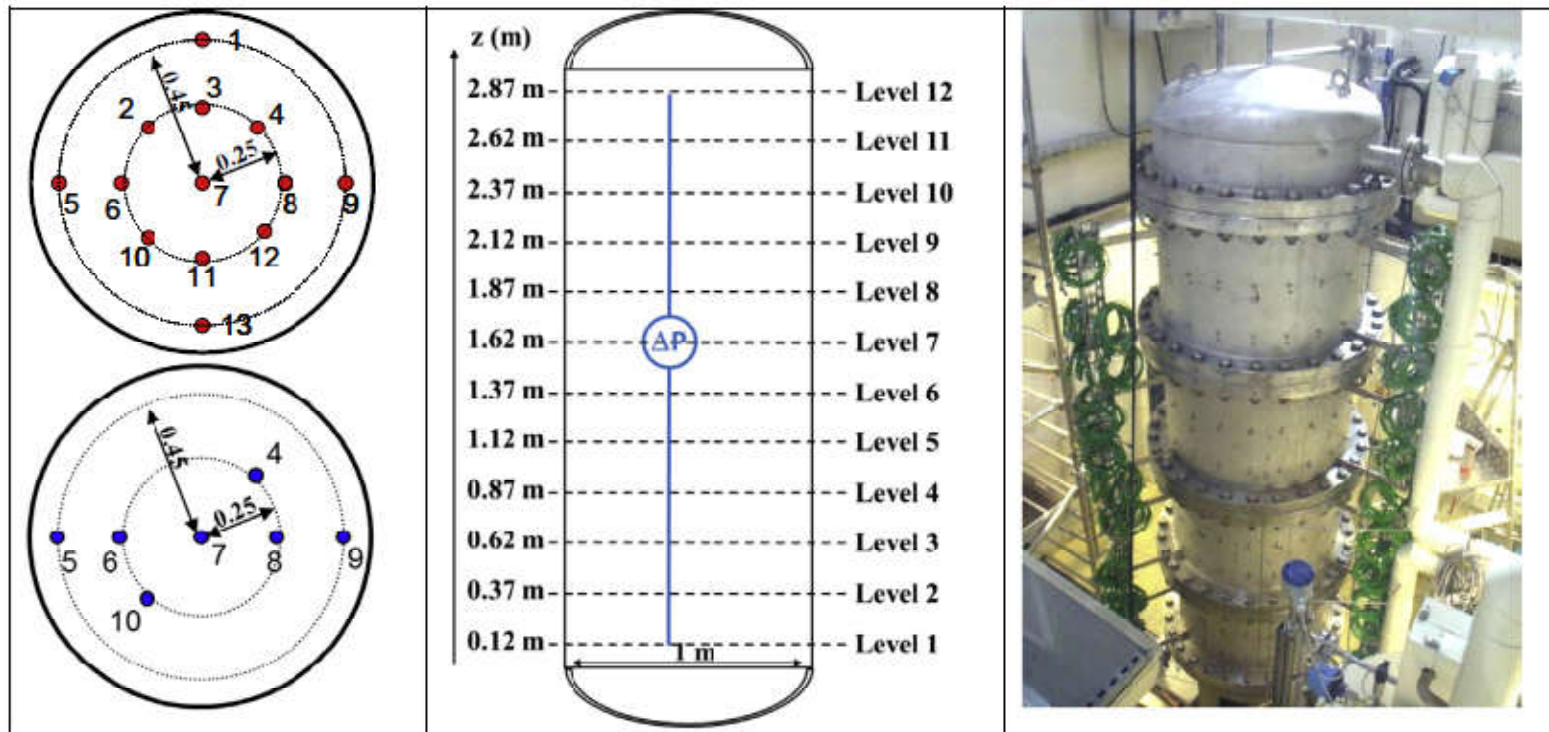
A. Bruch, J.F. Fourmigue, R. Couturier. Experimental and numerical investigation of a pilot-scale thermal oil packed bed thermal storage system for CSP power plant. *Solar Energy* 105 (2014) 116–125

单罐储热技术

实验研究

20%沙子（3mm大）+80%石子（30mm大）为填充物，孔隙率0.27；不锈钢罐，高3 m，直径1 m。350℃的导热油为传热流体。

实验系统



A. Bruch, J.F. Fourmigue, R. Couturier. Experimental and numerical investigation of a pilot-scale thermal oil packed bed thermal storage system for CSP power plant. *Solar Energy* 105 (2014) 116–125

单罐储热技术

单罐储热的理论分析

认为堆积床是连续、均匀、各项同性的多孔介质

连续性方程

$$\frac{\partial(\epsilon\rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho_l \vec{u}] = 0$$

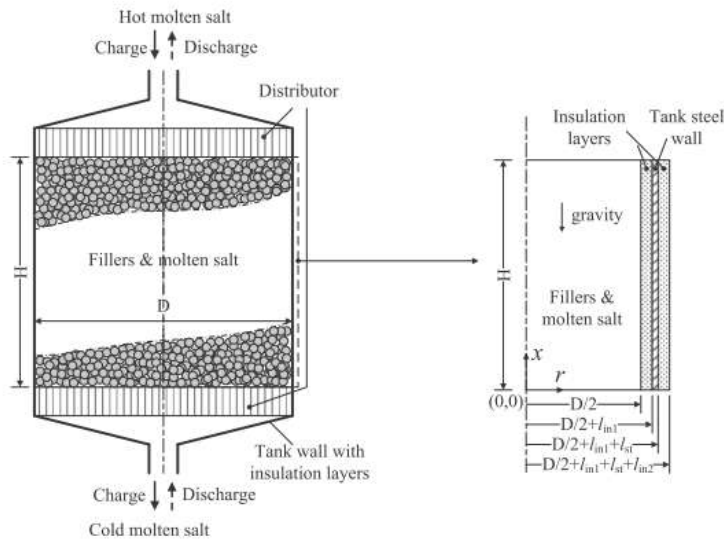
动量方程

$$\frac{\partial(\rho_l \vec{u})}{\partial(\epsilon t)} + \frac{\nabla \cdot [\rho_l \vec{u} \vec{u}]}{\epsilon^2} = \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) - \nabla p + \rho_l \vec{g} - \left(\frac{\mu}{K} + \frac{C_F \rho}{\sqrt{K}} |\vec{u}| \right) \vec{u}$$

$$K = \frac{d_p^2 \epsilon^3}{150(1-\epsilon)^2}$$

$$C_F = \frac{1.75}{\sqrt{150\epsilon^3}}$$

其中：K为多孔介质的渗透系数；CF为惯性系数



Chao Xu, Xin Li, Zhifeng Wang, Yaling He, Fengwu Bai. Sensitivity analysis of the numerical study on the thermal performance of a packed-bed molten salt thermocline thermal storage system. Applied Energy, 2012, 92: 65-75

单罐储热技术

单罐储热的理论分析

认为堆积床是连续、均匀、各项同性的多孔介质

能量方程

液相

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_l c_{p,l} T_l)}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho_l c_{p,l} \vec{u} T_l] = \nabla \cdot (\Gamma_{l,eff} \nabla T_l) + h_v(T_s - T_l)$$

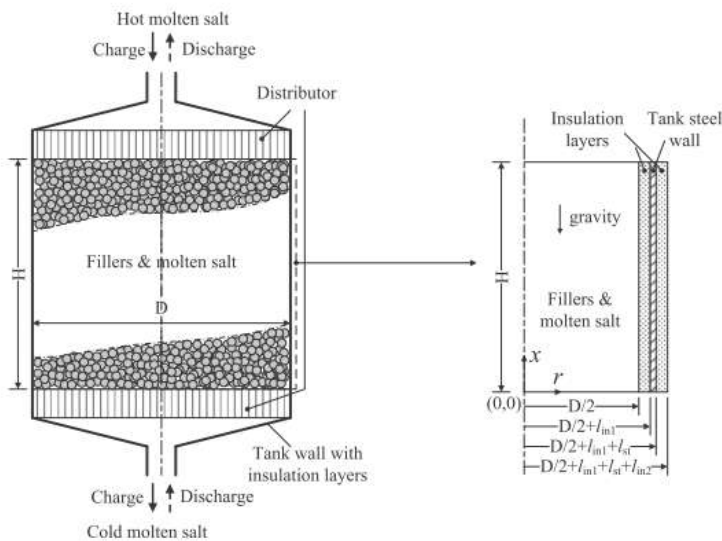
固相

$$\frac{\partial((1-\varepsilon)\rho_s c_{p,s} T_s)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma_{s,eff} \nabla T_s) - h_v(T_s - T_l)$$

钢板、保温板

$$\frac{\partial(\rho_i c_{p,i} T_i)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma_i \nabla T_i)$$

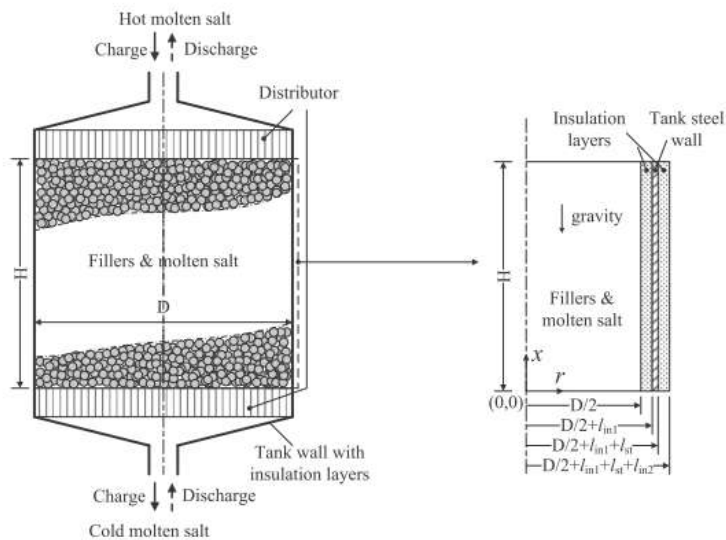
h_v 为液固耦合的关键参数，对流换热系数



单罐储热技术

单罐储热的理论分析

液固相的对流换热系数和液固相的有效扩散系数有很多的学者进行研究，因此，有很多不同的模型，使用的时候可以参考。



认为堆积床是连续、均匀、各项同性的多孔介质

边界条件

BC1 $(x=0, 0 \leq r < D/2)$

$$u|_+ = u_{in}, v|_+ = 0, T_f|_+ = T_{f,in}, \frac{\partial T_s}{\partial x}|_+ = 0$$

BC2 $(x=H, 0 \leq r < D/2)$

$$\frac{\partial u}{\partial x}|_- = 0, v|_- = 0, \frac{\partial T_f}{\partial x}|_- = 0, \frac{\partial T_s}{\partial x}|_- = 0$$

BC3 $(0 \leq x \leq H, r=0)$

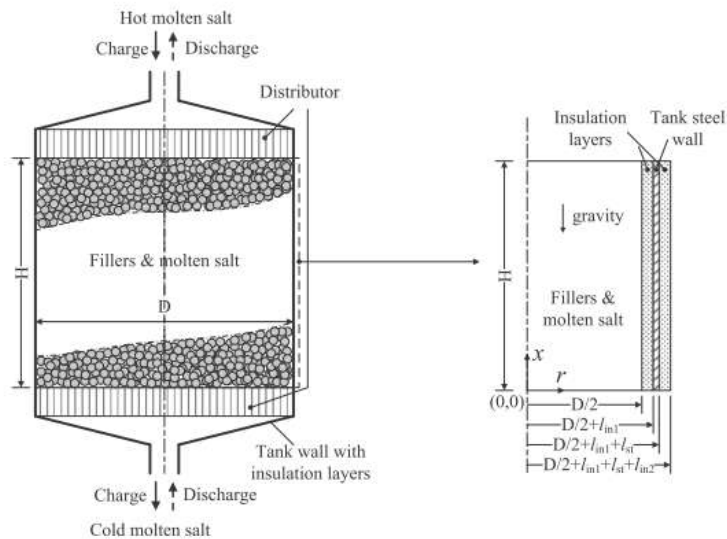
$$\frac{\partial u}{\partial r}|_+ = 0, v|_+ = 0, \frac{\partial T_f}{\partial r}|_+ = 0, \frac{\partial T_s}{\partial r}|_+ = 0$$

单罐储热技术

单罐储热的理论分析

认为堆积床是连续、均匀、各项同性的多孔介质

边界条件



BC4 ($0 \leq x \leq H, r = D/2 + l_{in} + l_{st} + l_{in2}$)

$$-k_{in2} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_- = h(T_{in2} - T_\infty)$$

BC5 ($x = H$ or $x = 0, D/2 \leq r < D/2 + l_{in} + l_{st} + l_{in2}$)

$$\frac{\partial T_{in1}}{\partial x} = \frac{\partial T_{st}}{\partial x} = \frac{\partial T_{in2}}{\partial x} = 0$$

BC6 ($0 \leq x \leq H, r = D/2$)

$$u \Big|_- = v \Big|_- = 0, \Gamma_{l,eff} \Big|_- \frac{\partial T_f}{\partial r} \Big|_- = \Gamma_{in1} \Big|_- \frac{\partial T_{in1}}{\partial r} \Big|_+, \Gamma_{s,eff} \Big|_- \frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_- = 0$$

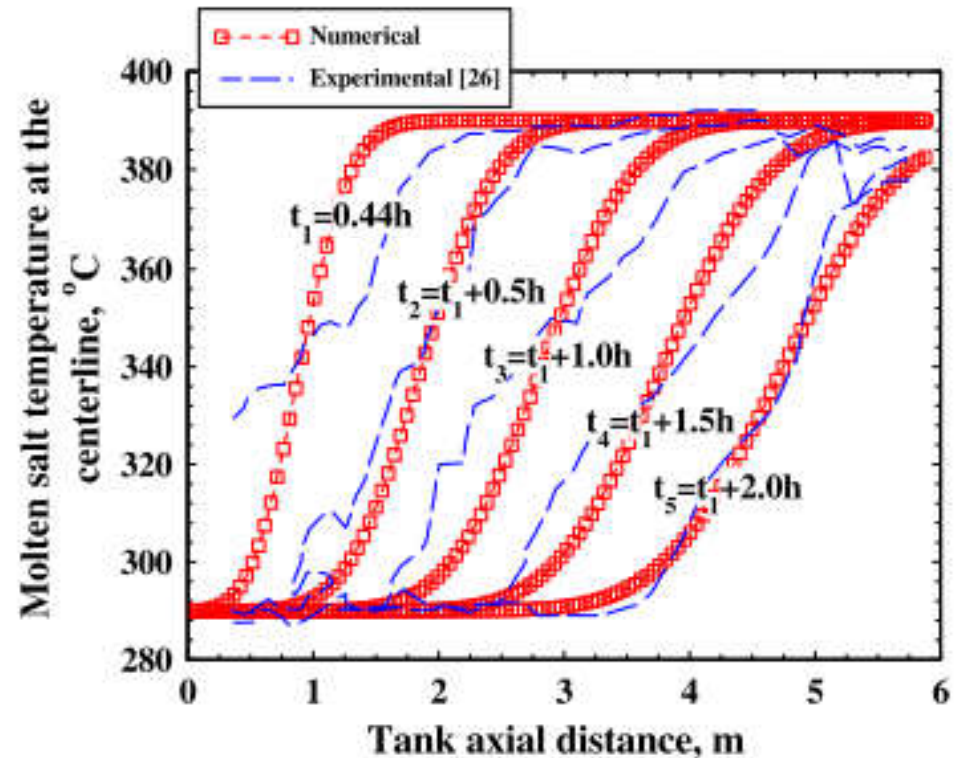
单罐储热技术

计算方法：传统的计算传热学问题，低速流体在固体多孔介质中的换热问题。

自编程序

FLUENT等商业软件

与实验数据对比



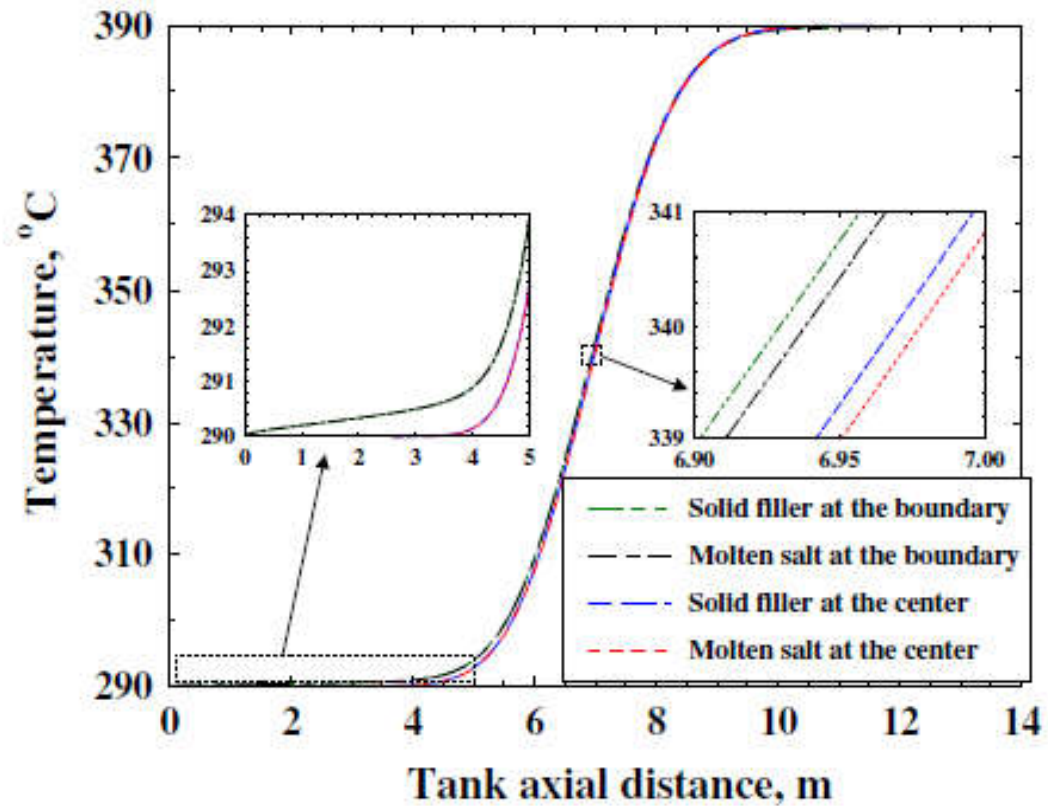
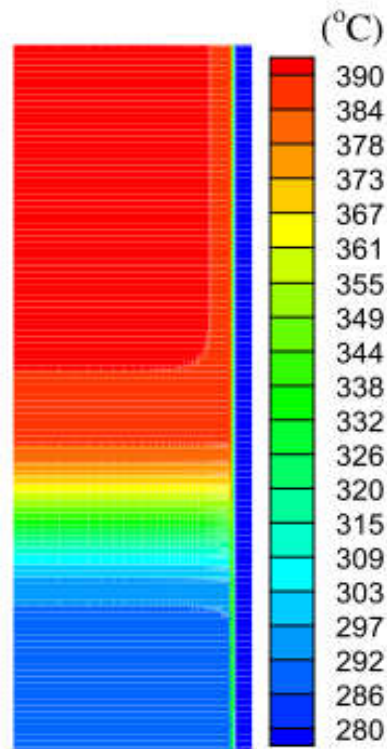
[26] J.E. Pacheco, S.K. Showalter, W.J. Kolb, Development of a molten-salt thermocline thermal storage system for parabolic trough plants, Journal of Solar Energy Engineering, 2002, 124 : 153-159.



单罐储热技术

基本物理规律

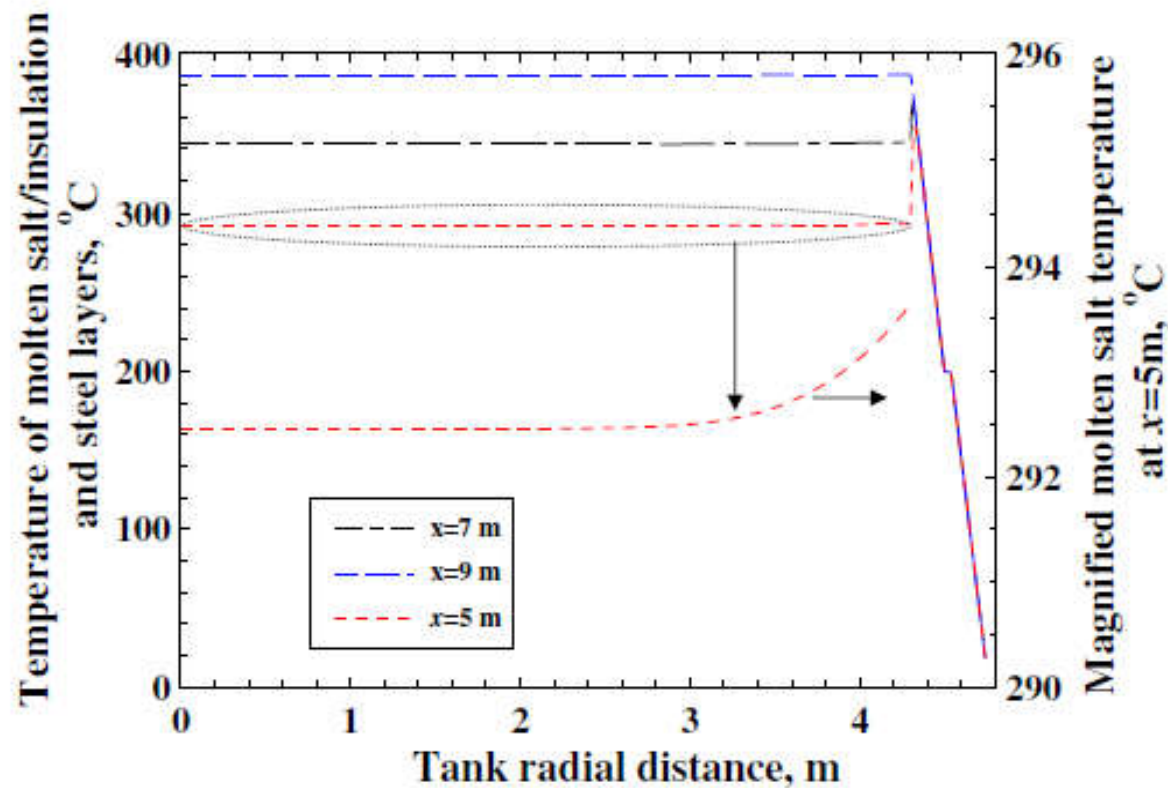
中心线上熔融盐和床料温度随罐高的变化



单罐储热技术

基本物理规律

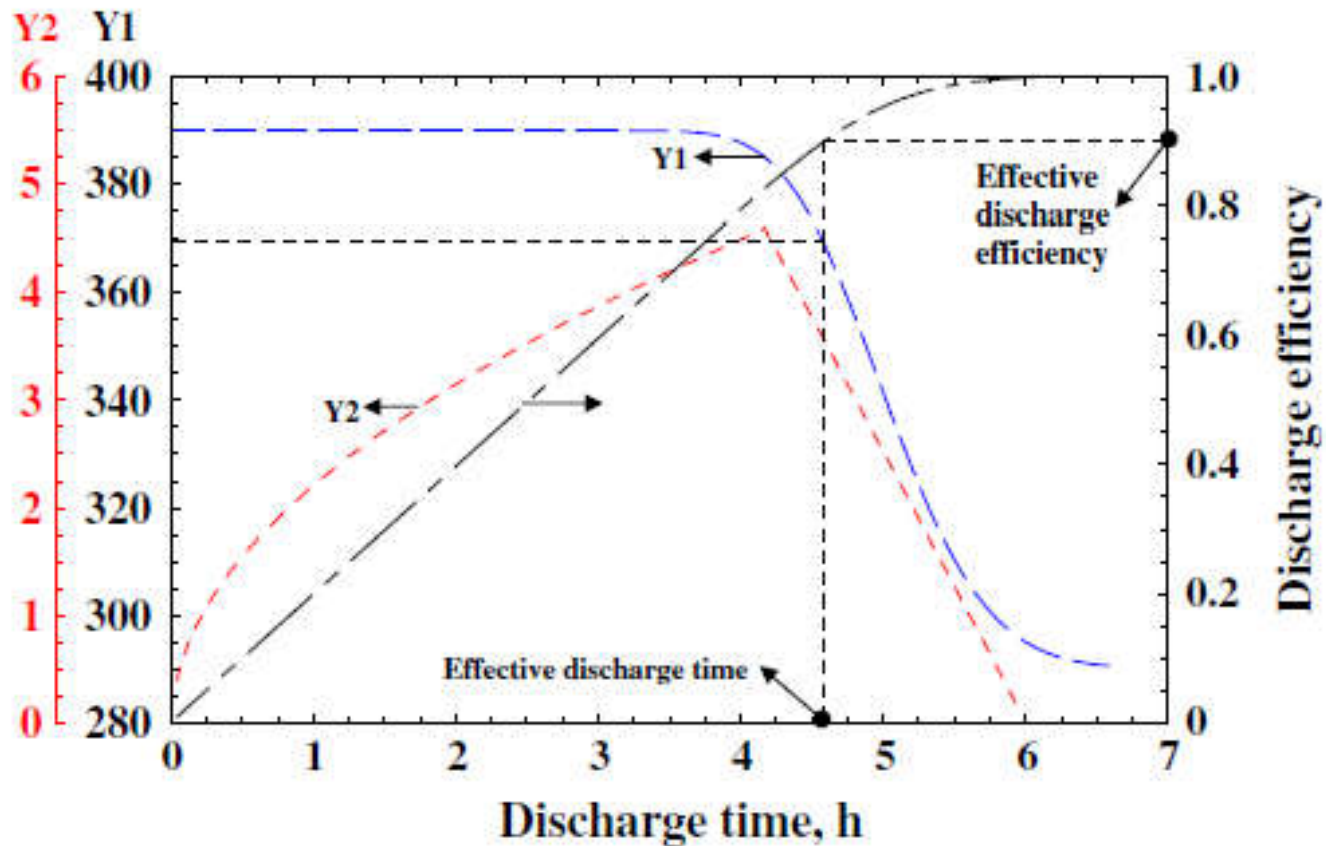
熔融盐径向温度分布在不同罐高位置变化



单罐储热技术

基本物理规律

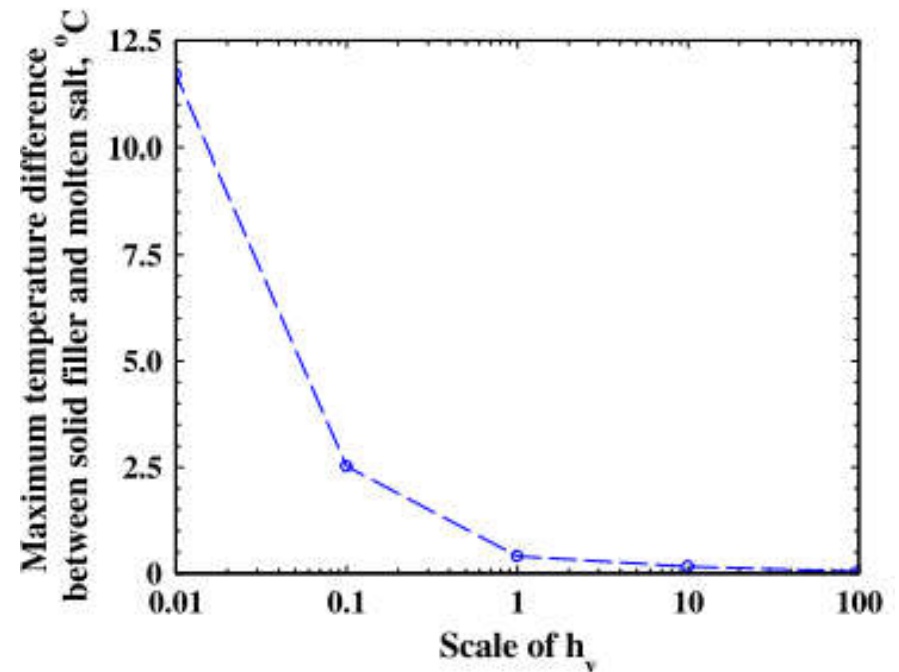
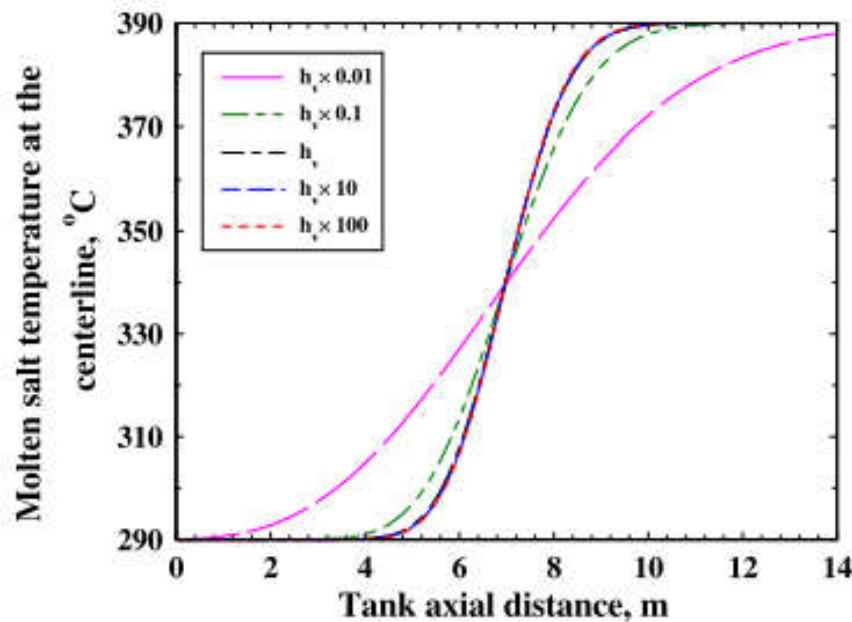
熔融盐出口温度、斜温层厚度、放热效率随放热时间的变化



单罐储热技术

关键参数的影响- h_v 按倍数变化

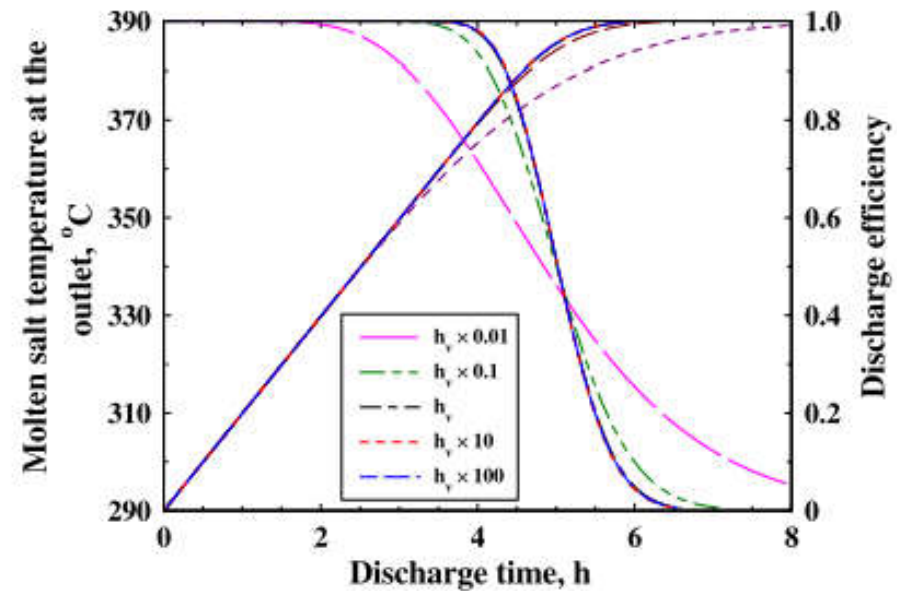
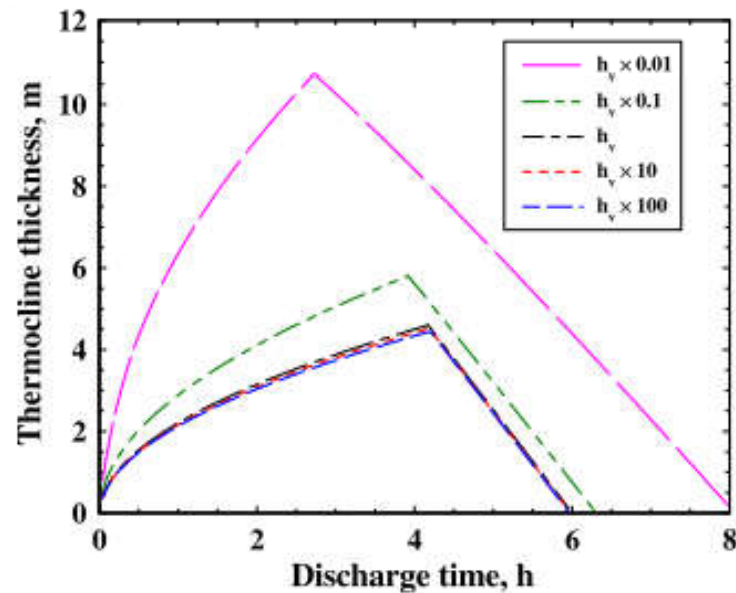
固液间换热系数越大，储热罐内的斜温层厚度越厚，储热效果越差。



单罐储热技术

关键参数的影响- h_v 按倍数变化

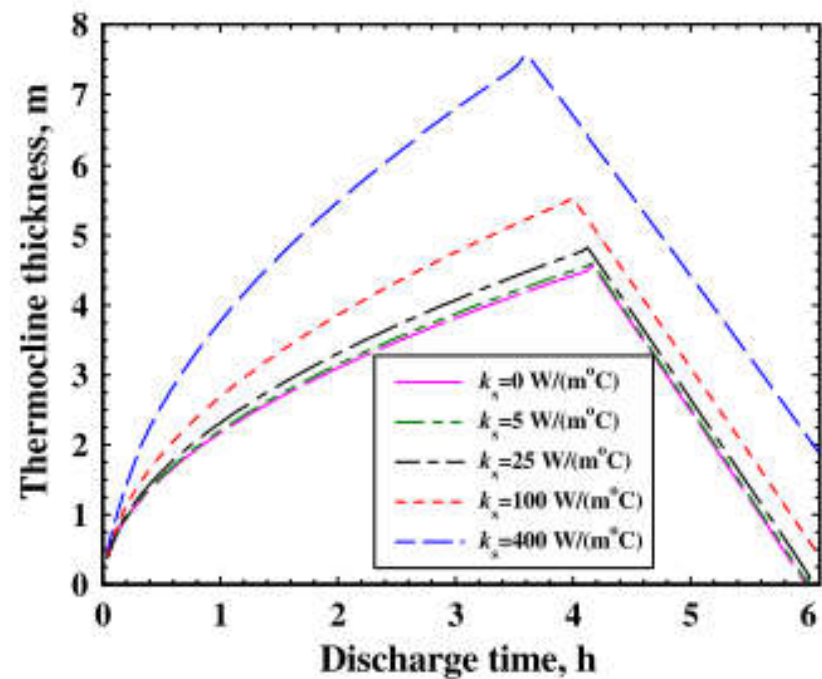
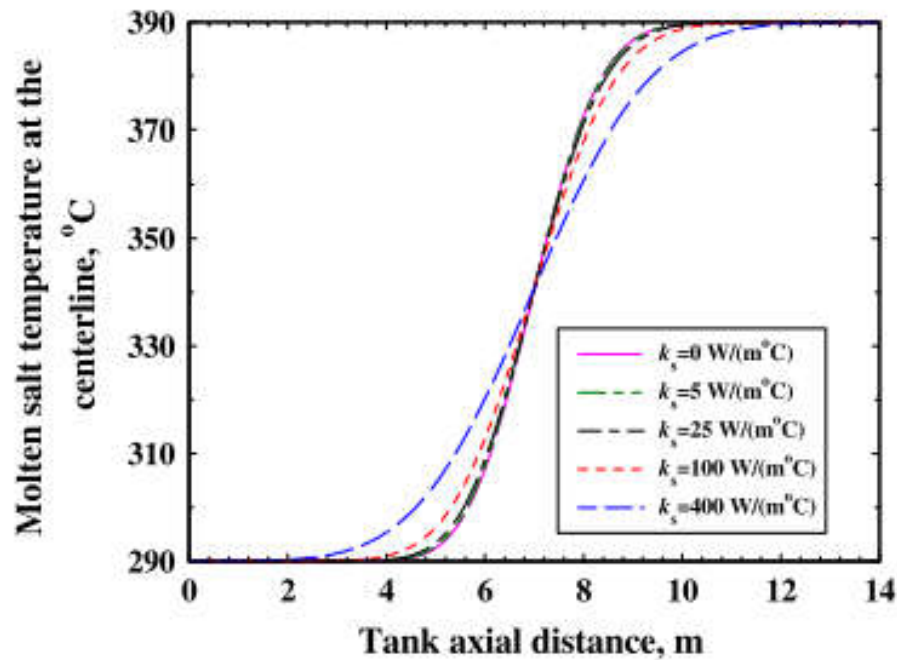
固液间换热系数越大，储热罐内斜温层厚度越厚，储热效果越差。



单罐储热技术

关键参数的影响-有效导热系数

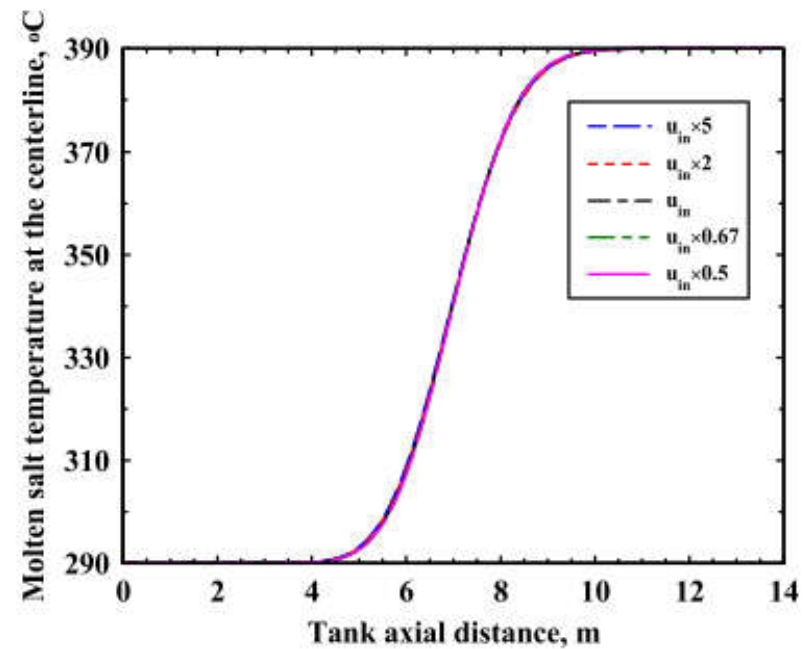
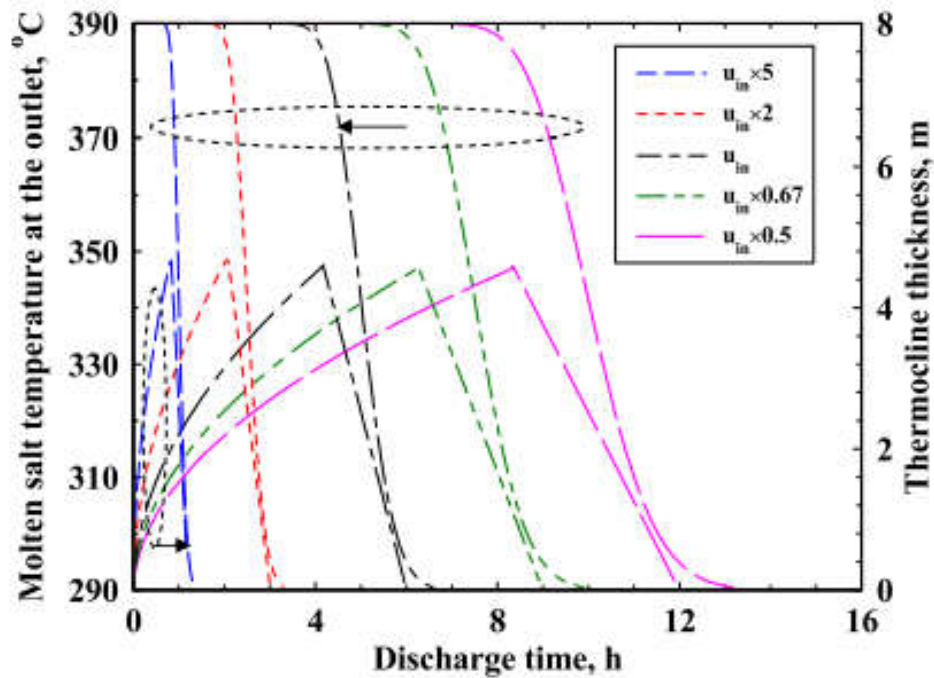
有效导热系数越大，斜温层厚度越厚，不利因素。



单罐储热技术

关键参数的影响-流体入口速度

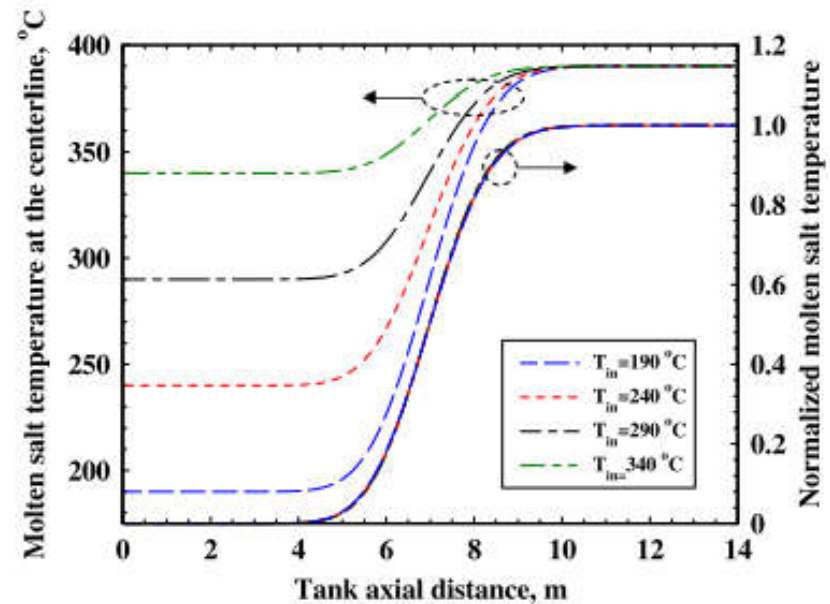
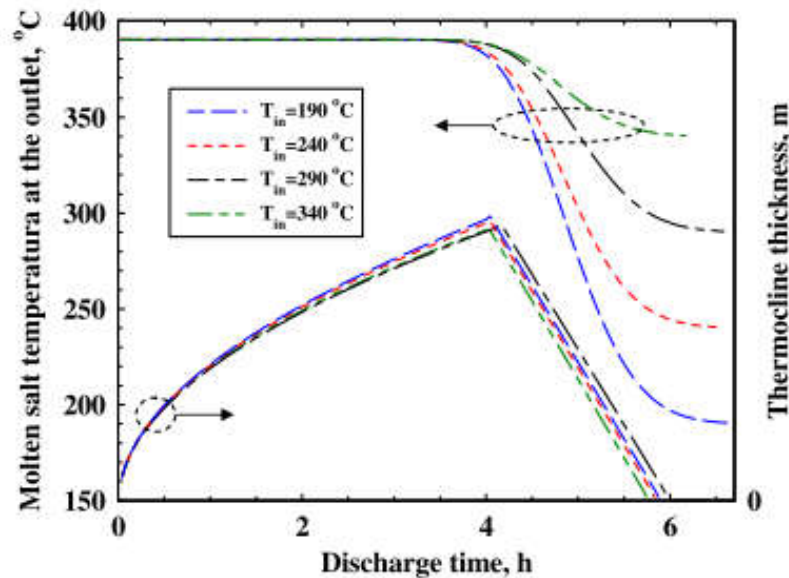
流体入口流速的变化对于最大斜温层厚度和放热效率的影响几乎可以忽略



单罐储热技术

关键参数的影响-流体入口温度

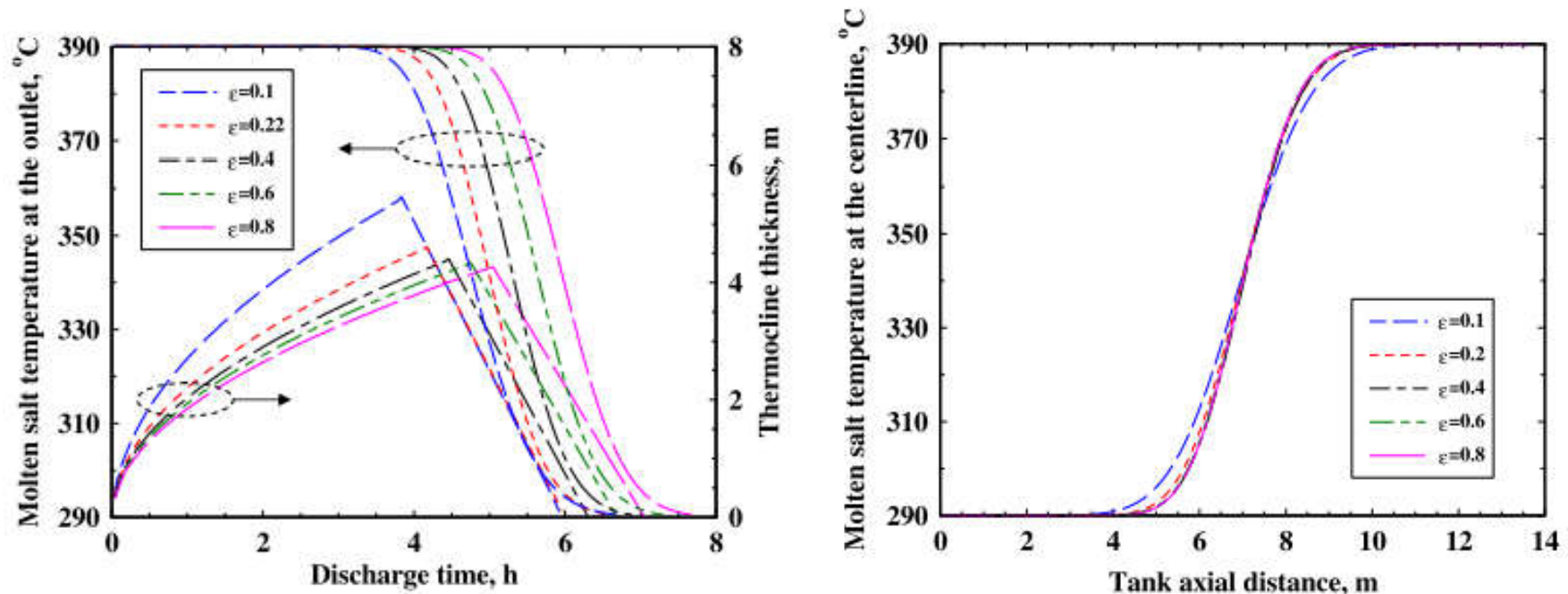
流体入口温度的变化对斜温层发展的影响几乎可以忽略



单罐储热技术

关键参数的影响-填充材料的孔隙率

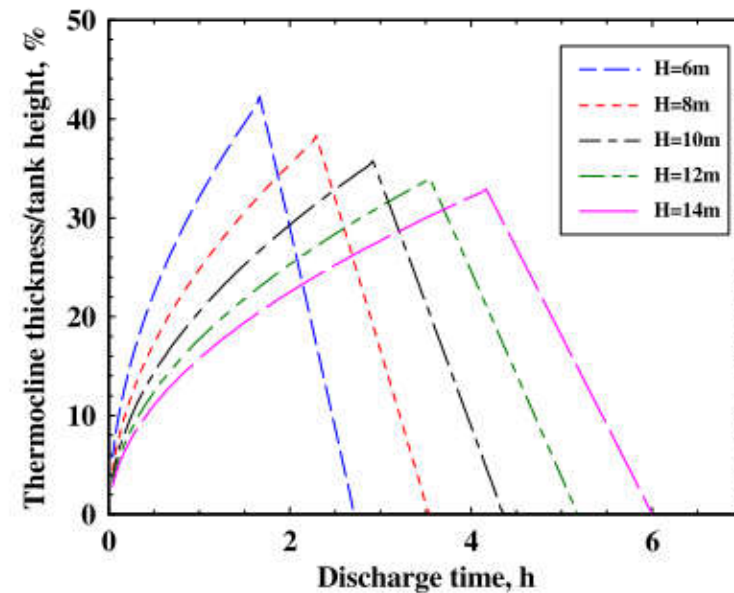
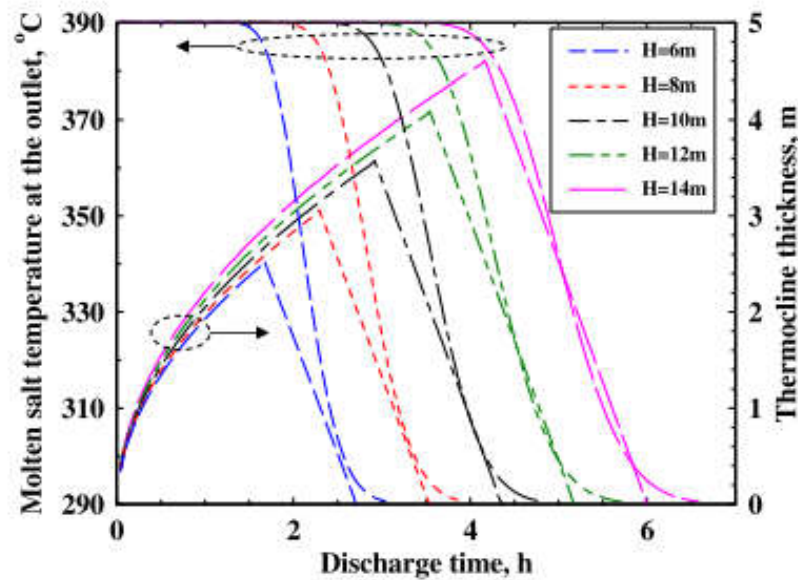
孔隙率越高越好



单罐储热技术

关键参数的影响- 罐体高度

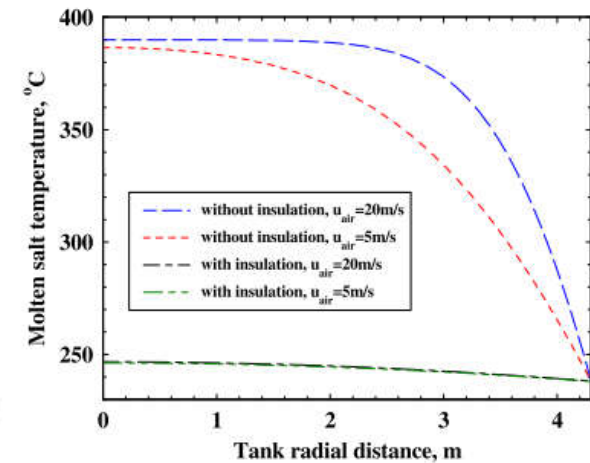
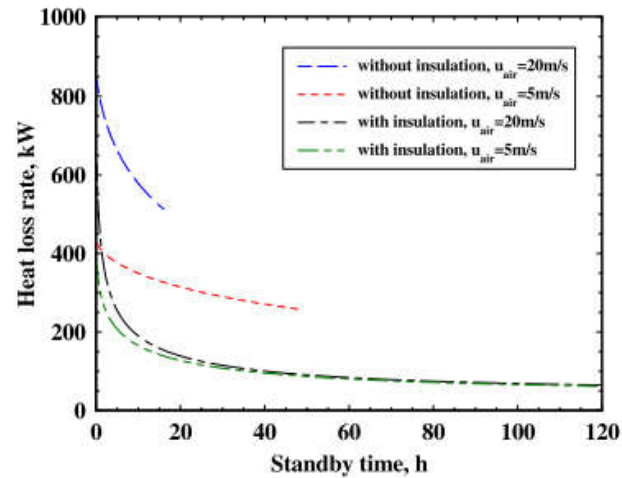
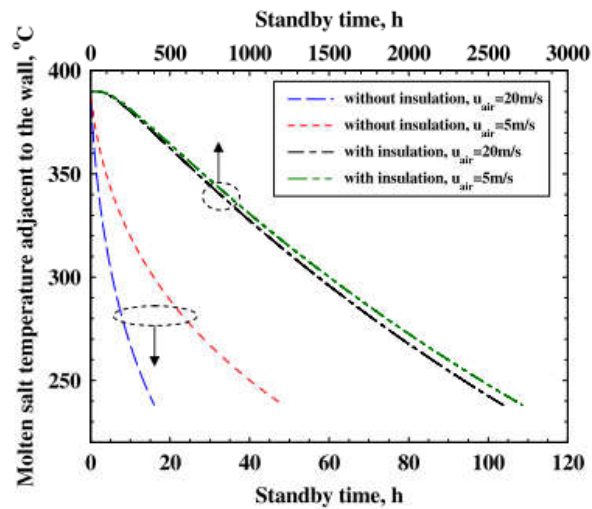
罐体越高具有更高的放热效率



单罐储热技术

关键参数的影响- 保温性能

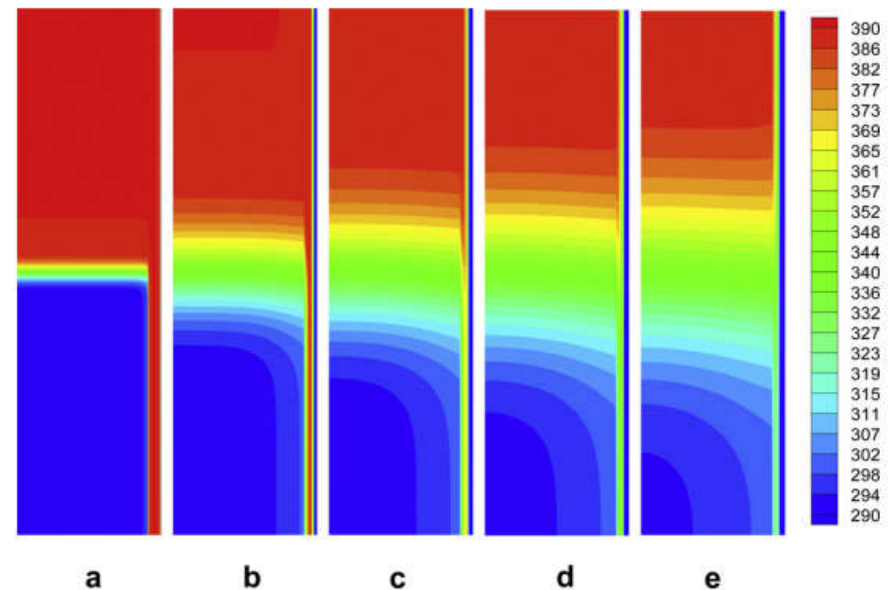
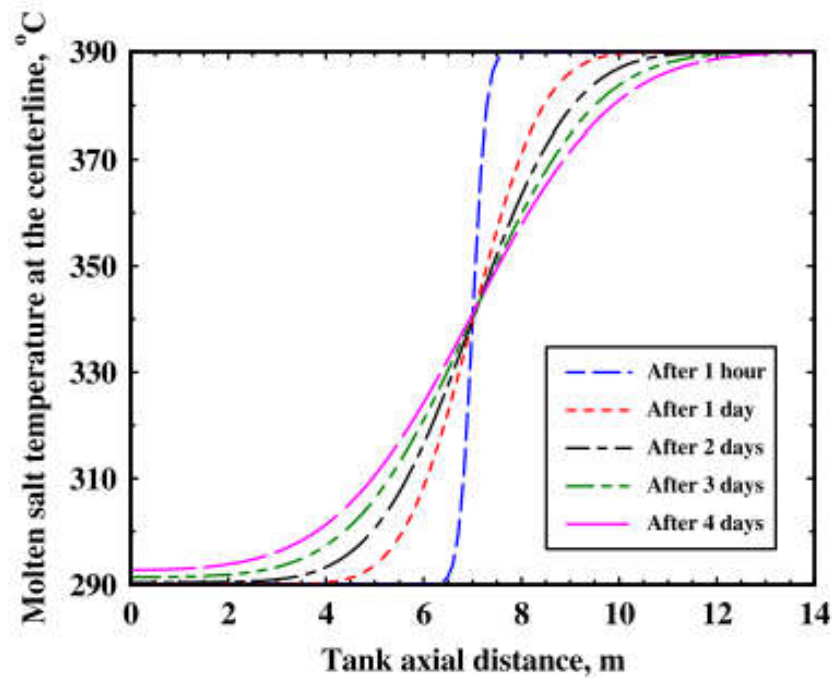
保温越好具有更高的放热效率



单罐储热技术

关键参数的影响- 保温性能

保温越好具有更高的放热效率



单罐储热技术

关键参数的影响- 填充物特性

- 不同于上面的假定固相为连续、均匀、各项同性多孔介质。如需对颗粒参数的影响进行研究，采用**dispersion-concentric model (D-C model)**。堆积床被处理成各项同性的多孔介质，该多孔介质由独立的球形颗粒组成。

固相能量方程

$$\frac{\partial(\rho_s c_{p,s} T_s)}{\partial t} = k_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial \xi^2} + \frac{2}{\xi} \frac{\partial T_s}{\partial \xi} \right)$$

边界条件

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial \xi} = h_p (T_l - T_s |_{\xi=R})$$

$$h_p = h_v / (6(1 - \varepsilon) / d_p)$$



Effects of solid particle properties on the thermal performance of a packed-bed molten-salt thermocline thermal storage system

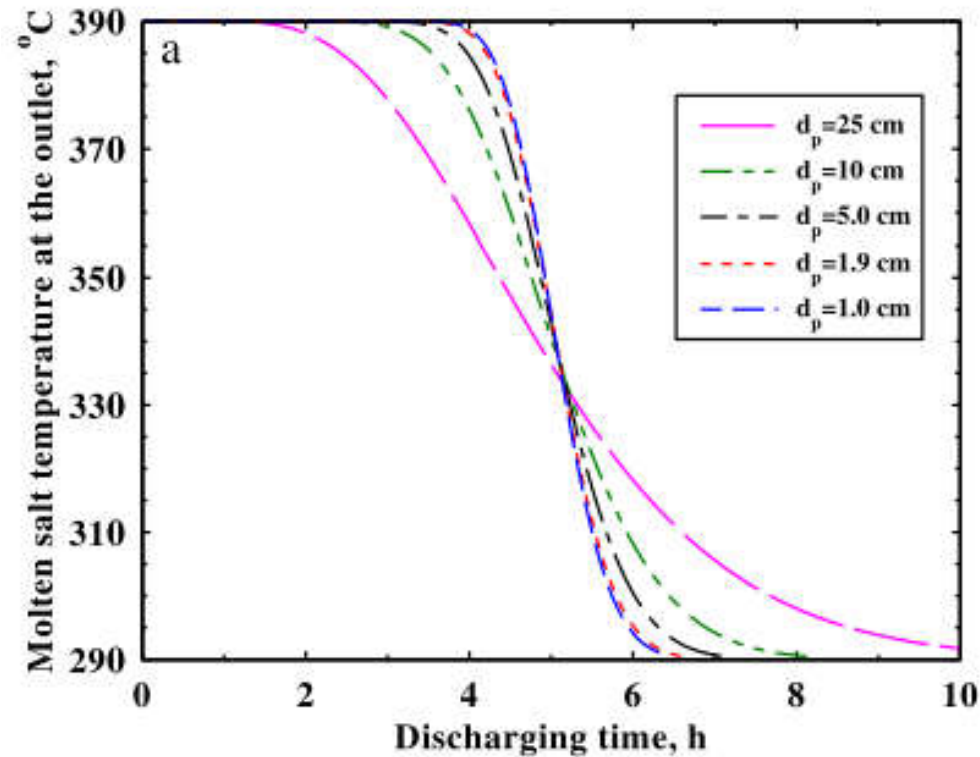
Chao Xu^{a,*}, Xin Li^a, Zhifeng Wang^a, Yaling He^b, Fengwu Bai^a



单罐储热技术

关键参数的影响- 填充物特性

填充颗粒尺度的影响- 熔融盐出口温度变化



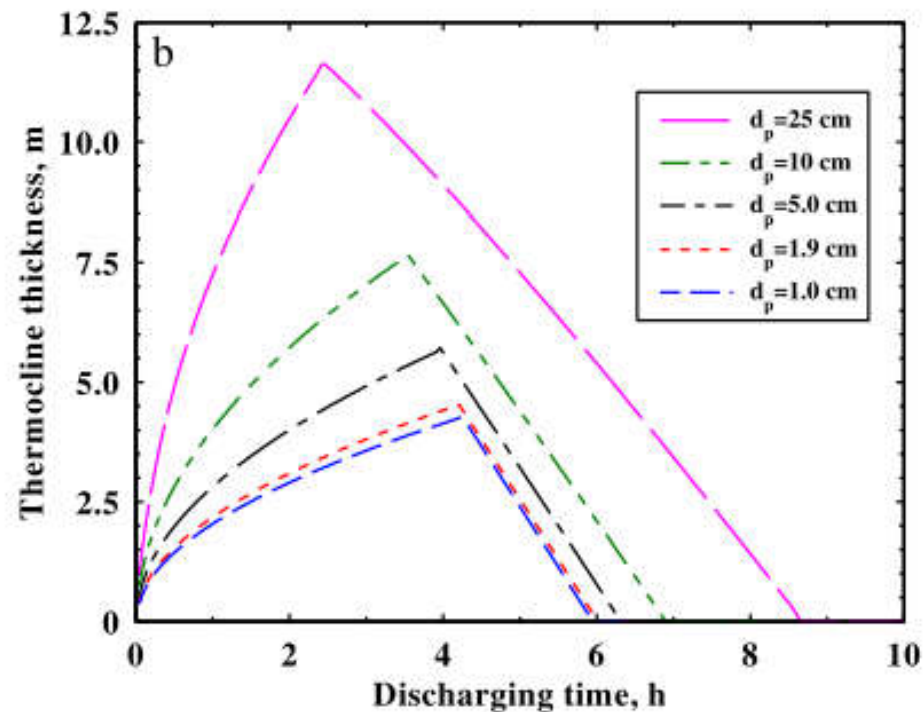
出口温度受颗粒大小影响显著



单罐储热技术

关键参数的影响- 填充物特性

填充颗粒尺度的影响-斜温层厚度变化



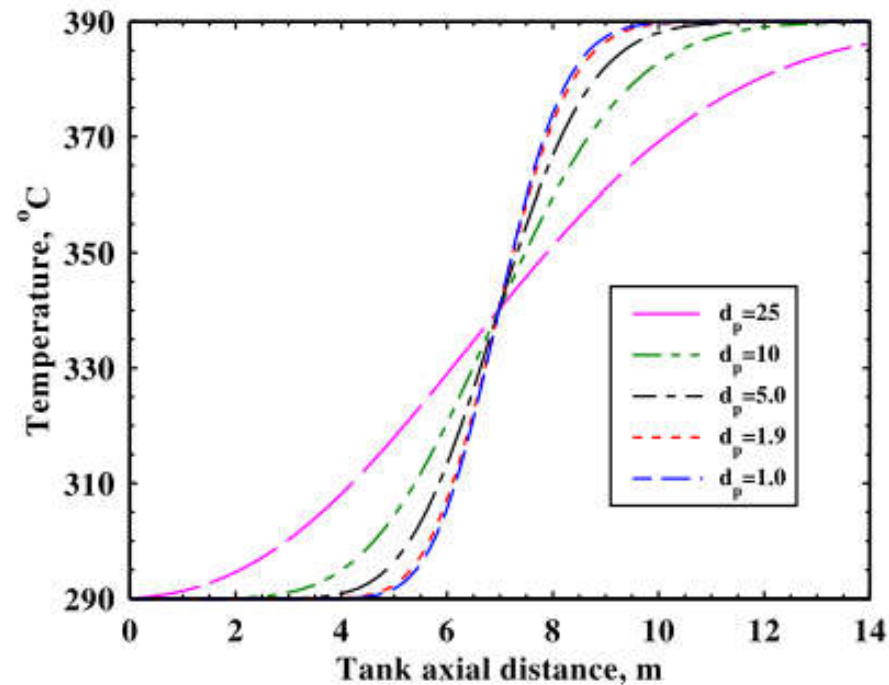
填充颗粒越大，斜温层越厚，越早的达到峰值



单罐储热技术

关键参数的影响- 填充物特性

填充颗粒尺度的影响-某时刻中心线温度沿高度方向变化

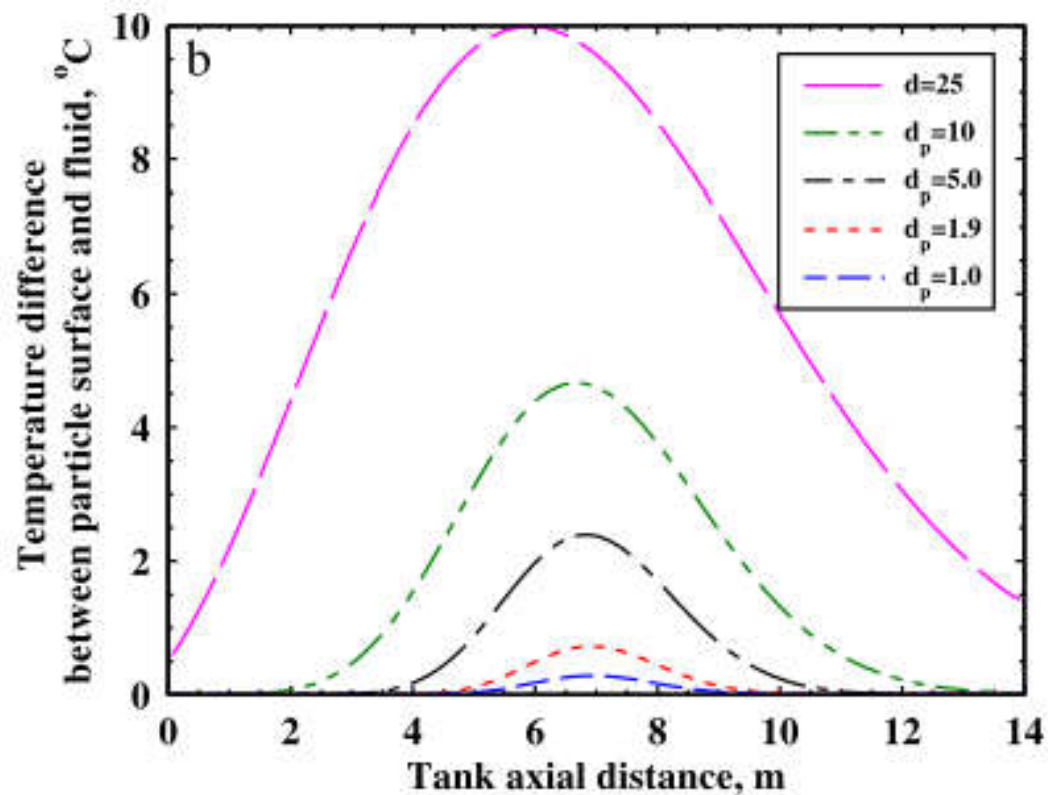


填充颗粒越大，越难形成斜温层

单罐储热技术

关键参数的影响- 填充物特性

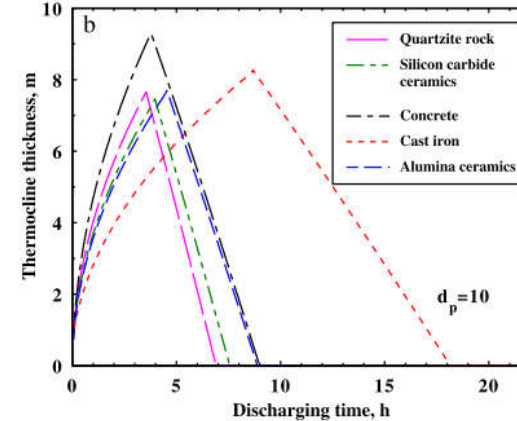
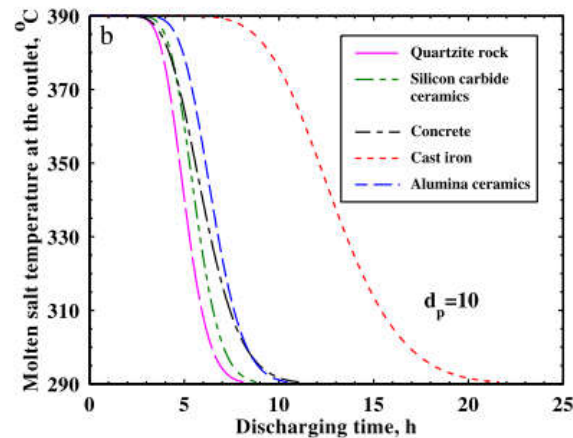
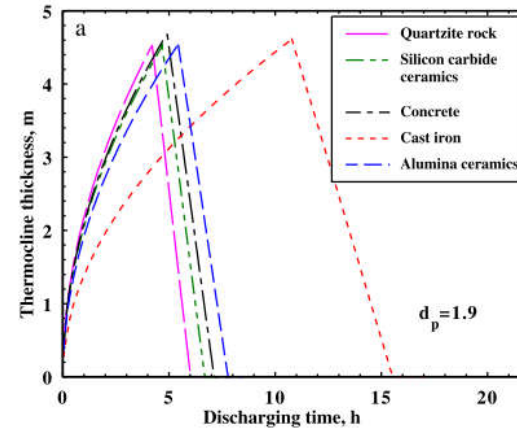
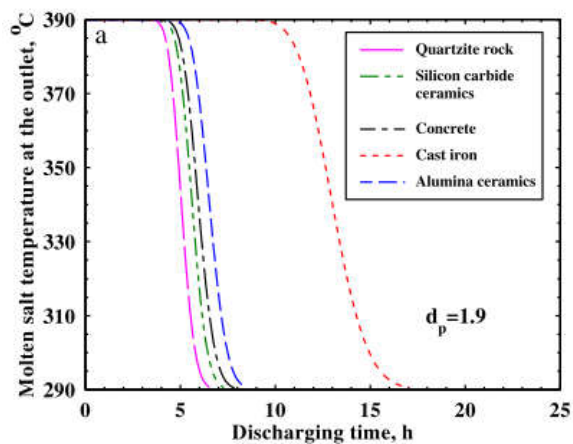
颗粒尺度应该尽可能的小



单罐储热技术

关键参数的影响- 填充物特性

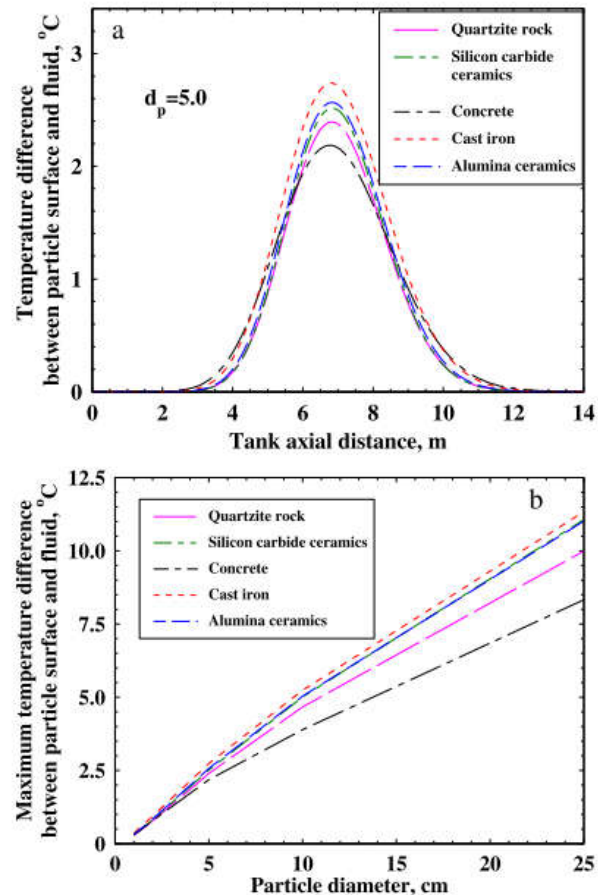
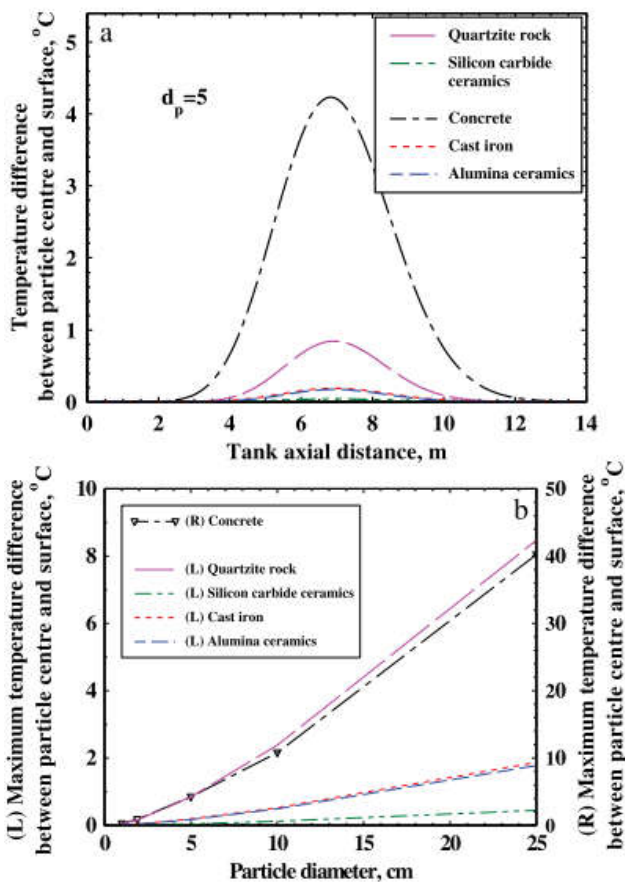
材料体积热容大则有效放热时间长



单罐储热技术

关键参数的影响- 填充物特性

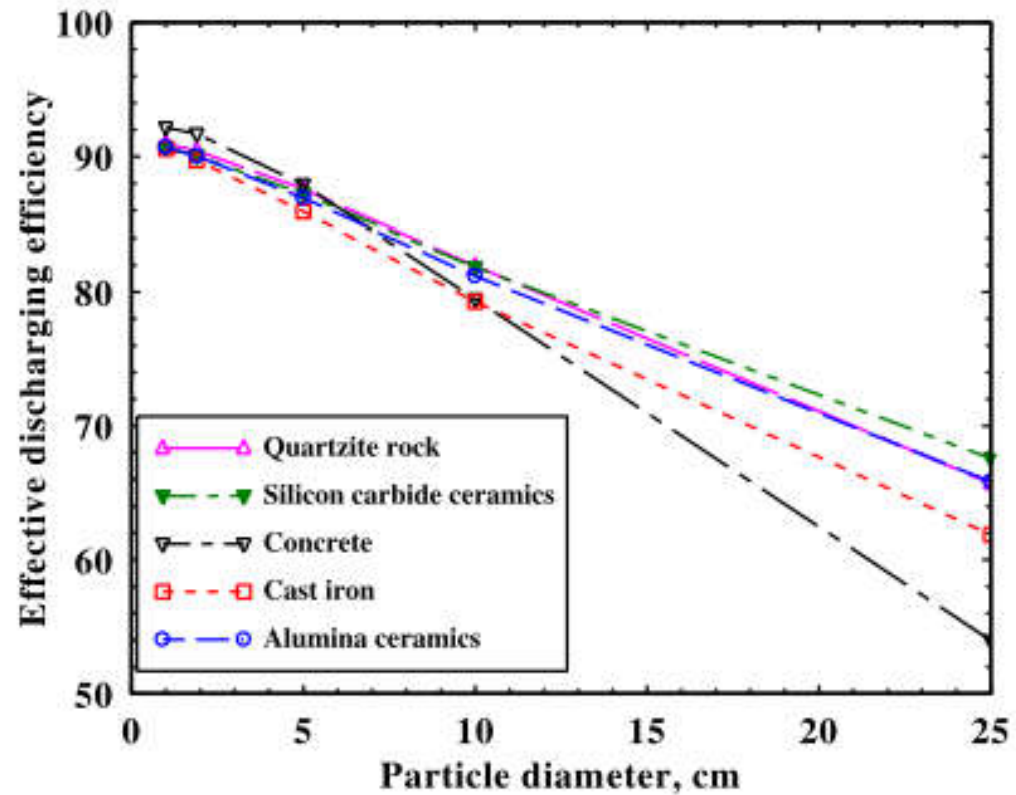
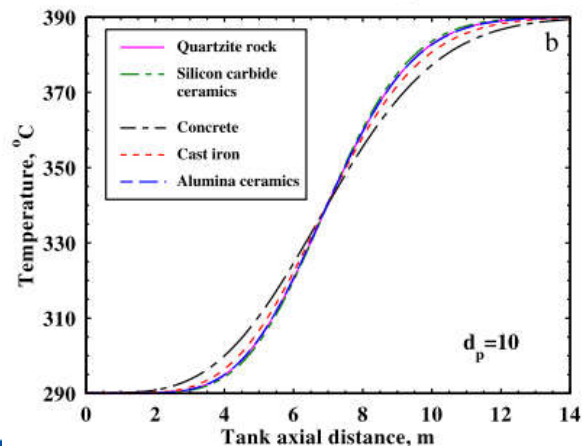
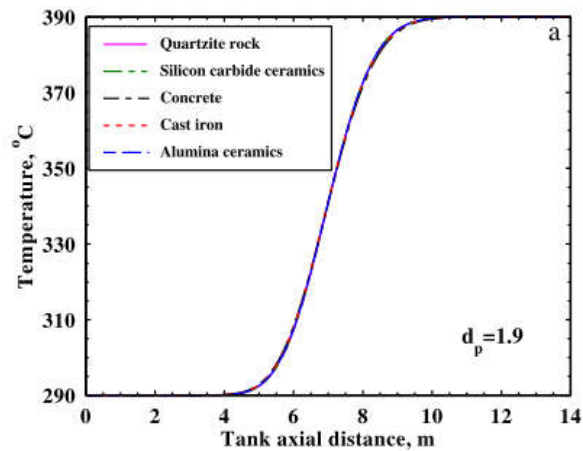
材料热导率低，放热速率也低。



单罐储热技术

关键参数的影响- 填充物特性

当颗粒尺度足够小，放热效率几乎与材料无关。



单罐储热技术

颗粒特性影响小结

- 在放热过程中颗粒中心与表面的温差先增大后减小。对于小颗粒，颗粒的温差相对于颗粒与熔融盐的温差小。
- 颗粒与熔盐之间的传热会大大受颗粒尺度的影响。颗粒尺度增加，导致颗粒温差增大，斜温层膨胀更快变厚，降低放热效率。
- 颗粒材料的影响受颗粒尺度影响。当颗粒足够小，放热效率几乎与材料无关。
- 对于较大的颗粒，导热系数低的材料向熔盐放热较慢。因而，高导热系数意味着较高的放热效率。





谢谢！

联系方式：baifw@mail.iee.ac.cn

实验室主页：www.chsel.com