文章编号:1001 - 2060(2023)06 - 0156 - 10

太阳光热填料床放热过程动态特性分析

岳 晨,汪 硕,徐 阳
(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘 要:为了改善太阳能不能连续稳定输出的问题,针对填料床放热过程,采用数值模拟方法研究了传热流体流速,温度以及填料床的高径比对填料床动态放热特性的影响规律。结果表明:在计算条件下,提高传热流体流速和温度是改善放热速率的关键参数,而提高填料床高径比有利于降低放热速率。当传热流体的进口流速由 0.000 5 m/s 增加至 0.001 3 m/s,填料床的平均放热速率提高了 150%,放热时间缩短了 54%,对放热密度无影响;传热流体进口温度为 473 K 上升至 513 K,填料床的平均放热速率下降了 32%,放热时间延长了 34%,放热密度下降了 6%;填料床高径比由 2.32 增加至 8.33,填料床的放热量无变化,放热完成时间增加了 113%,填料床的放热速率下降了 129%。

关 键 词:填料床;多孔介质;相变材料;蓄放热;动态特性

中图分类号:TK512 **文献标识码**:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.06.018

[**引用本文格式**]岳 晨,汪 硕,徐 阳. 太阳光热填料床放热过程动态特性分析[J]. 热能动力工程,2023,38(6):156 - 165. YUE Chen, WANG Shuo, XU Yang. Analysis of dynamic characteristics of solar thermal packed bed exothermic process[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(6): 156 - 165.

Analysis of Dynamic Characteristics of Solar Thermal Packed Bed Exothermic Process

YUE Chen, WANG Shuo, XU Yang
(School of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China, Post Code: 210016)

Abstract: In order to improve the problem that solar energy can not be continuously and stably output, this paper studied the influence of flow rate and temperature of heat transfer fluid and the aspect ratio of packed bed on the dynamic heat release characteristics of packed bed in the exothermic process by the numerical simulation method. The results show that increasing the flow rate and temperature of heat transfer fluid are the key parameters to improve the heat release rate, and increasing the aspect ratio is beneficial to reduce the heat release rate under the calculation condition. When the inlet flow rate of heat transfer fluid increases from 0.000 5 m/s to 0.001 3 m/s, the average heat release rate of packed bed increases by 150% and the heat release time decreases by 54%, and the heat release density is not affected; when the heat transfer fluid inlet temperature increases from 473 K to 513 K, the average heat release rate of packed bed decreases by 32%, the heat release time increases by 34%, and the heat release density decreases by 6%; when the aspect ratio of packed bed increases from 2.32 to 8.33, the heat release of packed bed is not changed, the heat release completion time increases by 113%, and the heat release rate decreases by 129%.

收稿日期:2022 - 05 - 17; **修订日期**:2022 - 06 - 15
基金项目:中央高校基本科研项目(NS2021016);江苏省自然科学基金面上项目(BK20191276)
Fund-supported Project: Fundamental Research Funds for the Central Universities (NS2021016); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20191276)
作者简介:岳 晨(1979 -),女,南京航空航天大学副教授.

Key words: packed bed, porous media, phase change material, heat storage and release, dynamic characteristics

引　言

伴随着经济的高速发展不可避免的会带来能源枯竭以及环境污染的双重问题,而可再生能源成为解决这一系列问题的途径[1-2]。在可再生能源中太阳能相比其他新能源具有其独特优势[3],将太阳能储存在相变或非相变材料中,这一方法一般用于解决太阳能的不连续稳定供能问题[4]。相比具有低储能密度的非相变储能材料,相变材料(Phase Change Material,PCM)具有储热性能更佳的优点[5],且结构简单、单位体积接触面积大。其中,球形相变材料可以将太阳能进行最大程度地储存及释放[6]。

国内外学者对填料床内部 PCM 蓄放热过程进行了深入研究。Panesi 等人[7-8]探究了传热流体(Heat Transfer Fluid,HTF)进口流速及进口温度变化对填料床储热过程的影响;Liao 等人[9-11]比较了不同 PCM 直径条件下填料床的蓄热过程;刘钟泽[12]采用 MATLAB 对填料床蓄热过程进行数值模拟,分析了单因素雷诺数 *Re*、斯蒂芬数 *St* 对填料床装置温度变化趋势和传热性能的影响。

综上,对于填料床的研究主要集中在蓄热动态过程。本文通过 COMSOL Multiphysics 软件对填料床的放热过程进行数值仿真计算,探究填料床关键操作参数,包括 HTF 进口流速、HTF 进口温度以及填料床结构参数对 HTF 出口温度、放热量及液相率等的影响规律。

1　填料床蓄放热系统物理模型

填料床蓄放热系统的物理模型如图 1 所示。系统主要由填料床、传热流体管路、换热器等组成[13]。表 1 为该模型的主要参数。填料床内部填充相变球形胶囊用于储存来自太阳能的热量并对其加以利用,选用适当的材料可以减少不必要的热量损失。传热流体从填料床进口流入填料床,吸收相变材料所释放的热量,从上端出口流出后在换热器中释放热量,最终流向填料床完成循环。

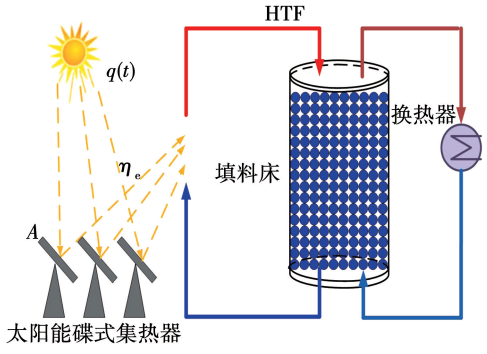

图 1　填料床蓄放热系统装置物理模型

Fig. 1 Physical model of packed bed heat storage and release system

表 1　填料床蓄放热系统主要参数[14]

Tab. 1 Main parameters of packed bed heat storage and release system[14]

参数	数值
填料床高度 H/m	5
填料床直径 D/m	1
孔隙率 ε	0.4
相变材料颗粒直径 d/m	0.025
初始工作温度 T_0/K	623

2　数值模拟方法

2.1　填料床放热数学模型假设

在局部热非平衡模型的基础上,采用瞬时扩散模型对填料床放热系统内部的传热进行计算,将填料床视为由独立球形相变胶囊组成的各向同性多孔介质。为提高计算速度,在建模过程中假设:(1) 填料床蓄放热系统的外壳绝热,模拟时只针对填料床多孔区域模拟;(2) 熔融盐在流动过程中不可压缩,视为牛顿流体;(3) 多孔区域的相变材料颗粒是等直径的球体;(4) 填料床蓄放热系统内部无内热源;(5) 忽略填料床内部辐射传热;

2.2　控制方程

采用局部非热平衡模型中的非等温流动模式将流体传热和自由多孔介质流动进行耦合,实现了流体流动和传热之间的关联。通过 Ergun 公式[15]描

述填料床内部的压降 Δp 与速度场 u 之间的关系：

$$\Delta p = \frac{\mu_f}{k}\boldsymbol{u} - \frac{1.75(1-\varepsilon)}{d\varepsilon^3}\rho \mid u \mid u \tag{1}$$

式中：ε—孔隙率，%；k—填料床的渗透性，$k = \frac{d^2\varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2}$，$m^2$；$\mu_f$—HTF 动力粘度，Pa · s；$d$—球型 PCM 颗粒直径，m；$u$—速度，m/s；$\rho$—密度，$kg/m^3$。

填料床内部填充球形颗粒的相变材料，由于固体和流体之间温差较大，需要分别考虑各相的能量平衡。

因此，采用局部非热平衡方法求解两个温度场，并通过热源热沉将其耦合：

$$\varepsilon\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-\varepsilon\lambda\nabla T) = q_{sf}(T_f - T) \tag{2}$$

$$(1-\varepsilon)\rho_f c_{p,f}\frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f c_{p,f}u_f \cdot \nabla T_f + \nabla(-(1-\varepsilon)\lambda_f \nabla T_f) = q_{sf}(T - T_f) \tag{3}$$

式中：q_{sf}—间隙对流换热系数，$W/(m^2 \cdot K)$；h_{sf}—间隙换热系数，与努塞尔数相关，$W/(m^2 \cdot K)$；ρ_f—传热流体密度，kg/m^3；λ_f—导热系数，W/(m · K)；$c_{p,f}$—传热流体比定压热容，kJ/(kg · K)；T_f—传热流体温度，K；T—相变材料温度，K；u_f—传热流体速度，m/s。

基于以上描述，该模型的数学控制方程[16]为：

对于液相：

$$\varepsilon\rho_f c_{p,f}\frac{\partial T_f}{\partial t} + \varepsilon u_f \rho_f c_{p,f}\frac{\partial T_f}{\partial y} = \varepsilon\lambda_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} + h_f(T_s - T_f) + h_w(T_w - T_f) \tag{4}$$

对于固相：

$$(1-\varepsilon)\rho_s c_{p,s}\frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-\varepsilon)\lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} + h_f(T_f - T_s) \tag{5}$$

填料床内部球形颗粒温度分布：

$$\rho_s c_{p,s}\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda_s r^2 \frac{\partial T_p}{\partial r}\right) \tag{6}$$

式中：r—相变颗粒半径；h_f—HTF 和固体之间的换热系数，$W/(m^2 \cdot K)$；T_s—PCM 固相温度，K；$c_{p,s}$—PCM 固相比定压热容，kJ/(kg · K)；ρ_s—PCM 固相密度，kg/m^3；h_w—填料床与环境换热系数，$W/(m^2 \cdot K)$；T_w为环境温度，K。

2.3 边界条件

放热过程：

$$\begin{cases} T_f(0,r,t) = T_{in} \\ T_f(H,r,0) = T_0 \\ T_s(t=0) = T_0 \end{cases} \tag{7}$$

PCM 胶囊：

$$\frac{\partial T}{\partial r}(r=0) = 0 \tag{8}$$

式中：T_{in}—放热过程传热流体的进口温度，K；T_0—放热过程填料床初始温度，K。

2.4 特征参数选择

在放热过程进口处的传热流体为定值。HTF 出口温度 T_{out}可反映填料床放热过程的快慢，PCM 的平均液相率β可从整体上反映填料床相变材料的变化，液相率由 Fluent 监视器检测出。放热量 Q_{dis}表示某时间段内放热总量，平均放热速率 P_{dis}表征整体放热速率，放热密度 q_{dis}反映填料床在放热过程的放热能力。

$$Q_{dis} = \int_0^t \dot{m} c_{p,f}(T_{in} - T_{out})\,dt \tag{9}$$

$$P_{dis} = \frac{Q_{dis,m}}{t_{dis}} \tag{10}$$

$$q_{dis} = \frac{Q_{dis,m}}{V} \tag{11}$$

式中：$\dot{m}$—HTF 质量流量，kg/s；T_{out}—HTF 出口温度，K；$Q_{dis,m}$—填料床放热量最大值，kJ；t_{dis}—填料床放热完成时间，min；V—填料床体积，m^3。

3 模型验证

为了验证数学模型的准确性，案例验证同样选取的是局部非热平衡模型中的非等温流动模式，并将模拟结果与 Bannach[16]进行比较。流经填料床传热流体的进出口温差为：

$$\frac{P_{wax}}{m_{wax}} = \rho_{wax} c_{wax}(T_{wax,in} - T_{wax,out}) \tag{12}$$

式中：P_{wax}—石蜡传热功率，kW；m_{wax}—石蜡质量，kg；$T_{wax,in}$—填料床进口处石蜡的温度，K；$T_{wax,out}$—填料床出口处水的温度，K；ρ_{wax}—石蜡密度，kg/m^3；$c_{p,wax}$—石蜡比定压热容，kJ/(kg · K)。

石蜡热物理属性如表 2 所示。

表 2　石蜡材料的属性

Tab. 2 Properties of paraffin materials

材料属性	石蜡固体	石蜡液体
熔点 T_{wax}/K	333	–
相变潜热 γ_{wax}/kJ·kg^{-1}	0.213	–
密度 ρ_{wax}/kg·m^{-3}	861	778
比定压热容 $c_{p,wax}$/kJ·(kg·K)$^{-1}$	1.850	2.384
导热系数 λ_{wax}/W·(m·K)$^{-1}$	0.4	0.15
初始温度 T_0/K	305	–

图 2 为填料床高度 $y=0.42$ m 时石蜡的温度变化曲线。可以看出,石蜡的温度有较好的相似性且误差控制在 3% 以内,验证本文数值建模的可行性[17-20]。

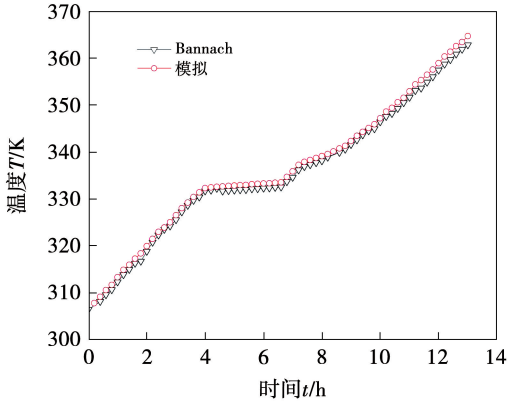

图 2　高度 0.42 m 处石蜡温度

Fig. 2 Paraffin temperatures at 0.42 m height

4　影响因素分析

填料床高度 $D=5$ m、直径 $H=1$ m;内部相变胶囊直径 $d=0.025$ m,孔隙率 $\varepsilon=0.4$;选用 Hitec 熔盐(7wt% $NaNO_3$ + 53wt% KNO_3 + 40wt% $NaNO_2$)为传热流体,Solar Salt(40wt% KNO_3 + 60wt% $NaNO_3$)为相变材料[14]。

二元混合硝酸盐 Solar Salt 热物理属性如表 3 所示。传热流体 Hitec 熔盐的热物理属性如表 4 所示。

将从传热流体的入口温度、入口流速以及填料床结构参数 3 个因素进行考虑,比较不同因素对填料床放热的影响。表 5 给出了填料床放热过程影响因素的取值范围。在此基础上,分析 HTF 出口温度、填料床放热密度、平均放热速率以及 PCM 平均液相率等参数对填料床放热能力和传热特性的影响。

表 3　相变材料 Solar Salt 热物理属性

Tab. 3 Thermal physical properties of phase change material Solar Salt

参　数	物　态	数　值
密度 ρ_{nit}/kg·m^{-3}	固态(538 K)	2 097
	液态(613 K)	1 846
比定压热容 $c_{p,nit}$/kJ·(kg·K)$^{-1}$	固态(538 K)	1.385
	液态(613 K)	1.531
导热系数 λ_{nit}/W·(m·K)$^{-1}$	固态(538 K)	0.562 0
	液态(613 K)	0.483 0
动力粘度 μ_{nit}/Pa·s	液态(613 K)	0.002 26
相变潜热 γ_{nit}/kJ·kg^{-1}	–	199.6
固相最高温度点 $T_{s,nit}$/K	–	550.0
固 – 液转变最高温度点 T_l/K	–	576.7

表 4　传热流体热物理属性

Tab. 4 Thermal physical properties of heat transfer fluid

参　数	数　值
密度 ρ_f/kg·m^{-3}	2 287
导热系数 λ_f/W·(m·K)$^{-1}$	0.390
比定压热容 $c_{p,f}$/kJ·(kg·K)$^{-1}$	1.45
动力粘度 μ_f/Pa·s	0.006 2

表 5　选取的影响因素及取值

Tab. 5 Selected influencing factors and their values

影响因素	取值范围
HTF 进口流速 u_f/m·s^{-1}	0.000 5,0.000 7,0.000 9, 0.001 1,0.001 3
HTF 进口温度 T_{in}/K	473,483,493,503,523
填料床高径比Ψ	2.32,3.57,5,6.52,8.33

在保证填料床填料量不变的前提下,填料床 5 种高度对应的填料床结构参数如表 6 所示。

不同填料床高度对应的高径比 Ψ 为:

$$\Psi = H/D \tag{13}$$

式中:H—填料床某尺寸下的高度,m;D—填料床某尺寸下的直径,m。

表 6 填料床 5 种结构尺寸

Tab. 6 Five structural dimensions of packed bed

序号	高径比 Ψ	高度 H/m	直径 D/m
1	2.32	3	1.30
2	3.57	4	1.12
3	5.00	5	1.00
4	6.52	6	0.92
5	8.33	7	0.84

4.1 HTF 进口流速对放热特性的影响

为比较不同 HTF 进口流速下的填料床放热特性，选取 0.000 5 ~0.001 3 m/s 5 种进口速度，填料床高径比 $\Psi=5$，高度 $H=5$ m，PCM 初始温度为 $T_0=673$ K，HTF 进口温度 $T_{in}=473$ K。

4.1.1 HTF 进口流速对出口温度的影响

选取 5 种 HTF 进口流速进行分析，进口流速对出口温度的影响如图 3 所示。给定 HTF 进口温度为 473 K、填料床高 5 m、直径为 1 m 的条件。

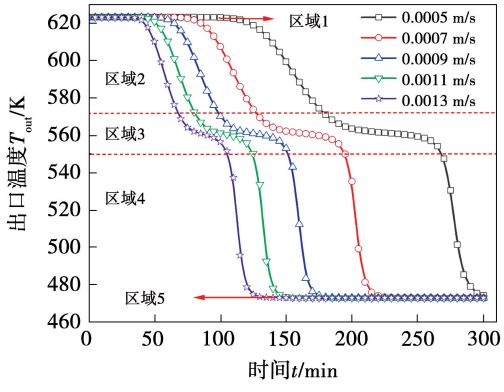

图 3 HTF 进口流速对出口温度的影响

Fig. 3 Effect of HTF inlet velocity on its outlet temperature

每条 HTF 出口温度曲线可以大致分为 5 个区域，在填料床放热的初始时刻，HTF 出口温度一致保持在 623 K 的高温，这表明开始储存在填料床出口处 PCM 的热量未能够被释放，在进口处就吸收 PCM 的热量到达出口温度；第 2 个区域是 HTF 的温度高于 PCM 相变的温度区间，此时填料床内部 PCM 处于释放其显热的过程；第 3 个区域是 HTF 出口温度在 PCM 的相变区间（550 ~ 576 K），出口处的 PCM 处于释放其潜热过程，因此在该过程温度变化较小；随着填料床放热时间的增加，处于区域 4 的 PCM 开始释放相变温度以下的显热并且温度下降较快；最后一个区域是 HTF，出口温度为 473 K，与进口温度相同，表明填料床内部的 PCM 和 HTF 温度相同，处于热平衡状态。

4.1.2 HTF 进口流速对 PCM 液相率的影响

不同进口流速下 PCM 液相率变化如图 4 所示。随着 HTF 进口流速越大，PCM 液相率由 1 减小为 0 所需的时间越短，这表明在 HTF 进口流速较大时，填料床的放热速度更快，有着更好的放热效率。例如，在 $u_f=0.000\ 5$ 和 $0.001\ 3$ m/s 的条件下，PCM 完成相变的时间由 275 min 下降到 115 min。同时，进口流速越高，进口处的雷诺数越大。HTF 与 PCM 间的对流换热系数 h_{sf} 与雷诺数 Re 相关[21]。由图 3 可知，HTF 进口流速增大，使其通过填料床多孔介质的流动加快，并且随着 HTF 进口流速的增加，Re 也会随着增加，因此 HTF 与 PCM 胶囊间的对流换热系数增加，对流强度也会随之增加，由此导致填料床放热过程提前结束。

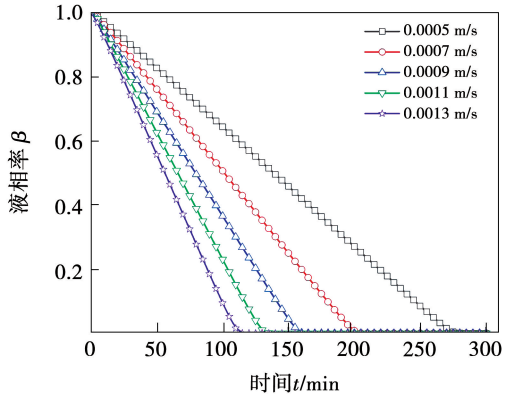

图 4 HTF 进口流速对 PCM 液相率的影响

Fig. 4 Effect of HTF inlet velocity on liquid phase ratio of PCM

4.1.3 HTF 进口流速对填料床放热量的影响

由图 5 可知，随着放热时间的增加，填料床放热量在不断增加，由于放热过程填料床进口的 HTF 处于低温条件，当 HTF 与 PCM 在填料床内部接触后就开始相变，填料床在放热过程 PCM 释放热量的过程显热释放和潜热释放同时进行的，因此热量的释放都是渐变的。这与徐桂芝[22]对于相变材料与 HTF 恒定进口温度的放热量计算结果相似的。在不同 HTF 进口流速下，由于进口流速的增大使得进口处 HTF 的 Re 增加，使放热过程中 HTF 和 PCM 的对流换热强度增加[23-24]，从而加快放热过程。$u_f=$

0.001 3 m/s 的条件下比 u_f = 0.000 5 m/s 能够提前 160 min,放热时间缩短了 139%。由于填料床的最初温度为 623 K、HTF 进口温度恒定在 473 K,因此,HTF 无论在何种流速工况下填料床最终的放热量均保持一致。

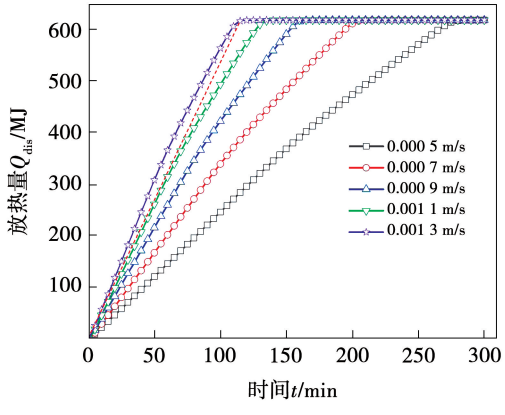

图 5　HTF 进口流速对填料床放热量的影响

Fig. 5 Effect of HTF inlet velocity on heat release of packed bed

4.1.4　HTF 进口流速对放热速率和放热密度的影响

图 6 为不同 HTF 进口流速下填料床在放热过程的放热特性差异。可以看出,在进口流速由 0.000 5 m/s 增加至 0.001 3 m/s 的范围内,填料床放热密度 ρ_{dis} = 154 MJ/m^3,表明进口流速对填料床的放热密度无影响;填料床的平均放热速率在增加,由 2 MJ/min 增加到 5 MJ/min,放热完成时间由 295 min 缩减至 135 min。由此可知,HTF 流速的增加并未提高填料的放热密度,但提高了填料床的换热特性,使 HTF 和 PCM 间对流换热强度有着很大程度的改善。

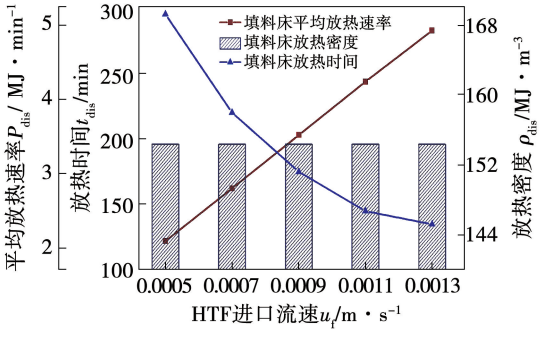

图 6　HTF 进口流速对填料床放热特性的影响

Fig. 6 Effect of HTF inlet velocity on heat release characteristics of packed bed

4.2　HTF 进口温度对放热特性的影响

为比较不同 HTF 进口温度下的填料床放热特性,选取 473 ~ 513 K 5 种进口温度,填料床高径比 Ψ = 5,高度 H = 5 m,PCM 初始温度为 T_0 = 673 K,HTF 进口流速 u_f = 0.000 9 m/s。

4.2.1　HTF 进口温度对 HTF 出口温度的影响

图 7 为在不同进口温度下 PCM 的温度变化趋势,其中 HTF 与 PCM 温度差可以表征填料床放热过程中的传热驱动能力[25],并且使用斯蒂芬数 St 可以进一步说明:

$$St = \frac{c_{p,m}(T_w - T_m)}{L} \tag{14}$$

式中:$c_{p,m}$—PCM 比定压热容,kJ/(kg · K);T_w—相变胶囊外表面温度,K;T_m—PCM 的相变温度,K;L—PCM 的比焓,kJ/kg。

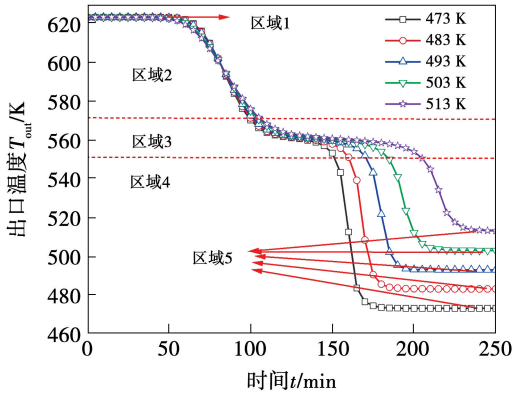

图 7　HTF 进口温度对 HTF 出口温度的影响

Fig. 7 Effect of HTF inlet temperature on HTF outlet temperature

当 HTF 进口温度增加时相变胶囊外表面温度也随之增加,因此 St 会减小,HTF 与 PCM 间的传热驱动力变小。由图 7 可知,当 HTF 进口温度 473 K 时出口温度下降的速度比 HTF 进口温度为 513 K 更为显著,说明 HTF 进口温度为 473 K 时,填料床放热能力更强。填料床完成放热的时间由 T_{in} = 473 K 时 175 min 增至 T_{in} = 513 K时 230 min,这表明 HTF 进口温度越低越有利于填料床的放热。出口温度变化曲线分为 5 个区域:区域 1,出口处的 PCM 未能够释放其热量;区域 2,HTF 的温度有所下降,此时 HTF 吸收 PCM 所释放的高于相变温度区间的显热;区域 3 时,

HTF 与发生相变的 PCM 进行换热,此时 HTF 与 PCM 的温度变化均较小;最后两区域分别为 HTF 吸收 PCM 释放低于相变区间的显热以及最终完成放热的过程,区域5 的 HTF 与 PCM 的温度相同,处于热平衡状态。

4.2.2 HTF 进口温度对 PCM 液相率的影响

由图 8 可知,在填料床放热过程中 PCM 的液相率不断减小,低温的 HTF 流经填料床使得其周围的 PCM 发生相变直至完成放热。随着 HTF 进口温度的增加,PCM 液相率曲线斜率随之递减,其物理意义为 PCM 凝固速率随着 HTF 进口温度增加而减小,即随着 HTF 进口温度的增加,St 减小,填料床放热过程中的传热驱动能力下降。

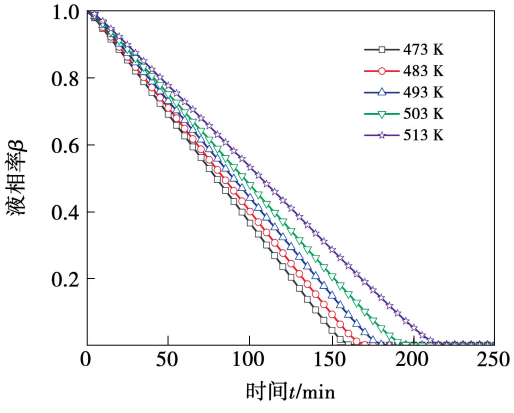

图 8 HTF 进口温度对 PCM 液相率的影响

Fig. 8 Effect of HTF inlet temperature on liquid phase ratio of PCM

4.2.3 HTF 进口温度对填料床放热量的影响

不同 HTF 进口温度下填料床放热量变化如图 9 所示。在相同的放热时间内增加 HTF 进口温度会致使 HTF 与 PCM 间的温差减小,St 会减小,填料床放热驱动力下降导致其放热完成时间会一定程度上增加,并且随着 HTF 进口温度由 473 K 增加到 513 K,填料床最终的温度也会维持在 473 K 和513 K,所释放的热量从 617 MJ 减小至 562 MJ。在填料床放热的初始阶段 HTF 与 PCM 温差大,填料床放热速率大于中后期。HTF 进口温度始终低于 PCM 的相变温度,因此当 HTF 进入填料床内部 PCM 就开始相变,填料床放热量逐渐增大。

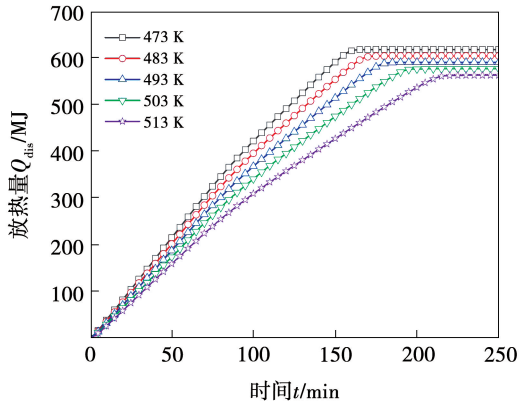

图 9 HTF 进口温度对填料床放热量的影响

Fig. 9 Effect of HTF inlet temperature on heat release of packed bed

4.2.4 HTF 进口温度对放热密度和放热速率的影响

填料床放热特性参数与 HTF 进口温度的关系如图 10 所示。图 10 填料床在不同 HTF 进口温度下的放热特性具有较大差异性。随着 HTF 进口温度由 473 K 增加至 513 K,平均放热速率 P_{dis} 和放热密度 ρ_{dis} 在减小,放热完成时间 t_{dis} 明显变长。在 HTF 进口温度为 473 K 时,填料床完成放热只需要 175 min,而当进口温度上升至 513 K,完成放热时间增加至 235 min,放热时间增加了 34%。当 $T_{in}=473$ K 时,填料床的平均放热速率 $P_{dis}=3\ 528$ kJ/min、放热密度 $\rho_{dis}=1.54\times10^5$ kJ/m^3;当 $T_{in}=513$ K 时,填料床的平均放热速率 $P_{dis}=2\ 394$ kJ/min、放热密度 $\rho_{dis}=1.41\times10^5$ kJ/m^3,填料床的平均放热速率、放热密度分别下降了 32% 和 6%。表明,HTF 进口温度对于填料床放热量的影响小于对填料床放热能力的影响,这是由于 HTF 进口温度对 St 影响更大, HTF 进口温度较低的的填料床具有更强的放热驱动力,会使填料床释放更多的热量,两者综合致使较低进口温度工况下的填料床的平均放热速率更高。

4.3 填料床结构对放热特性的影响

为探究对填料床结构对其放热特性的影响,选取 5 种填料床高度,填料床直径 $D=5$ m。PCM 初始温度 $T_0=673$ K,HTF 进口流速 $u_f=0.000\ 9$ m/s,HTF 进口温度 $T_{in}=473$ K。

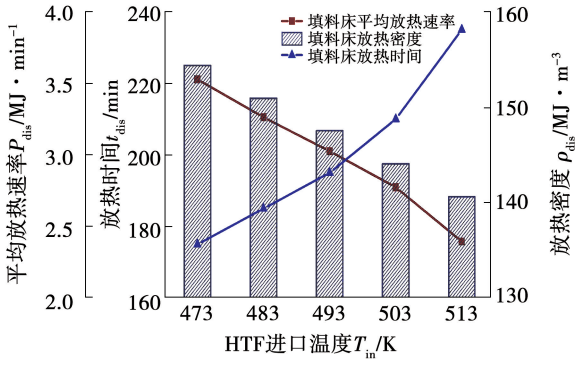

图 10　HTF 进口温度对填料床放热特性的影响

Fig. 10 Effect of HTF inlet temperature on heat release characteristics of packed bed

4.3.1　填料床结构对 HTF 出口温度的影响

图 11 为不同填料床高度下 HTF 出口温度的变化趋势。当填料床高径比 Ψ 在 2.32 至 8.33 之间的 5 种工况下 HTF 出口温度变化趋势相似。填料床完成放热的时间不断增大,表明填料床高径比 Ψ 越大,完成填料床放热所需时间越长。

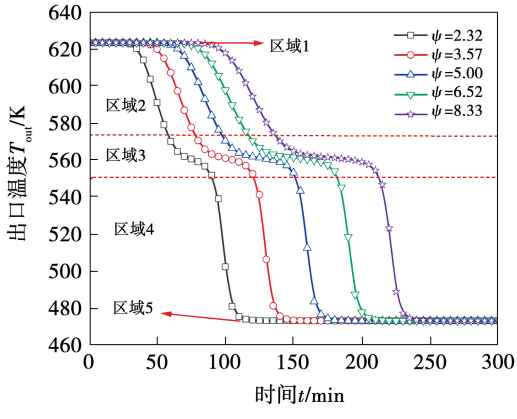

图 11　填料床高径比对出口温度的影响

Fig. 11 Effect of aspect ratio of packed bed on its outlet temperature

4.3.2　填料床结构对 PCM 液相率的影响

填料床高径比 Ψ 对 PCM 液相率的影响如图 12 所示。当 Ψ 由 2.32 增加至 8.33,PCM 的斜率在不断减小。其物理意义在于,随着 PCM 凝固速率随着 Ψ 的增大而变小。这是由于在同一 HTF 进口温度和进口流速下,当 Ψ 增加,HTF 流经填料床需要耗费更长的时间,并且随着 HTF 在填料床内部流动高度的增加其本身的温度也在下降,因此 HTF 与 PCM 的温差在下降。此时的 St 在减小,致使传热驱动力在下降,因而需要耗费更多的时间使填料床内部的 PCM 完全凝固,并完成放热过程。

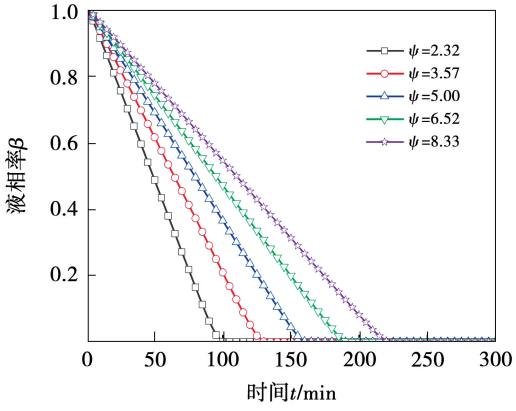

图 12　填料床高径比 Ψ 对 PCM 液相率的影响

Fig. 12 Effect of aspect ratio of packed bed on liquid phase ratio of PCM

4.3.3　填料床高径比对填料床放热量的影响

5 种填料床结构工况下放热量变化趋势相似,均缓慢增加,如图 13 所示。低温 HTF 进入填料床内部使高温的 PCM 在初始时刻就释放热量,可见填料床的放热过程是伴随着 PCM 向 HTF 释放显热以及潜热并发生相变。在 5 种填料床结构下,PCM 的初始温度始终是 623 K,放热结束后的温度均是 473 K,且填料床质量保持不变,因此填料床最终放热量保持不变。

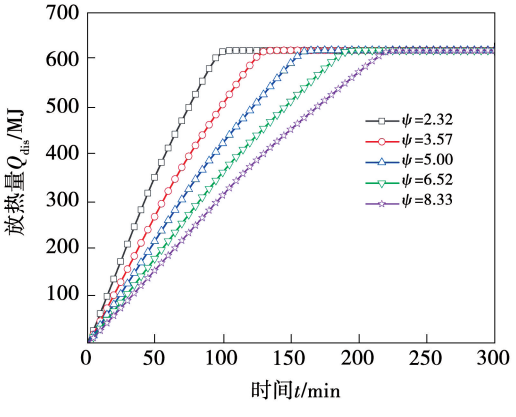

图 13　填料床高径比对其放热量的影响

Fig. 13 Effect of aspect ratio of packed bed on its heat release

4.3.4 填料床高径比对放热密度和放热速率的影响

填料床高径比 Ψ 对其放热特性影响如图 14 所示。Ψ 由 2.32 增至 8.33,平均放热速率 P_{dis} 下降明显、放热完成时间 t_{dis} 大幅增加,放热密度 ρ_{dis} 保持不变。当 Ψ = 2.32 ~ 8.33,放热密度维持稳定,表明填料床的结构对填料床放热密度无影响。当 Ψ = 2.32 时填料床放热完成时间为 100 min,当 Ψ = 8.33 时填料床放热完成时间为 230 min,放热时间增加 113%。表明,增大填料床高径比会延长放热时间。Ψ = 2.32 提高到 Ψ = 8.3,放热速率由 6 175 kJ/min 降至 2 685 kJ/min,下降 129%。表明,增大填料床高径比会大幅降低放热速率。

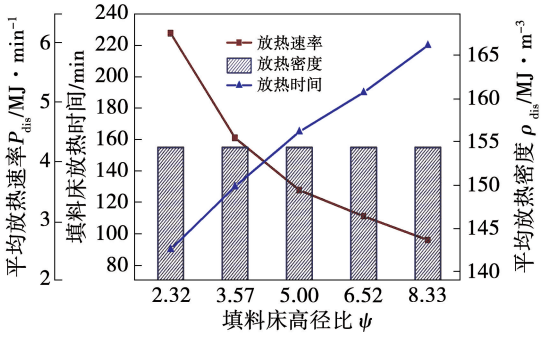

图 14 填料床高径比对其放热特性的影响

Fig. 14 Effect of aspect ratio of packed bed on its heat release characteristics

5 结 论

通过对填充相变胶囊的填料床进行放热过程数值仿真,分析了进口流速、进口温度以及填料床高径比对填料床放热特性的影响,得出结论:

(1) HTF 进口流速的增加会使雷诺数 Re 增加,提高其与 PCM 间对流换热强度,使填料床在整个放热过程放热速率明显增加,当 HTF 进口流速由 0.000 5 m/s增加至 0.001 3 m/s,填料床的平均放热速率提高了 150%,填料床完成放热时间缩短了 54%,对填料床的放热密度无影响。

(2) HTF 进口温度的增加会降低 St,使填料床放热驱动力下降,HTF 进口温度由 473 K 上升至 513 K,填料床的平均放热速率下降了 32%,填料床放热完成时间延长了 34%,并且使填料床的放热密度下降了 6%。

(3) 当填料床高径比由 2.32 增加至 8.33,填料床的放热密度不变,放热完成时间增加了 113%,放热速率下降了 129%。

参考文献:

[1] SARBU I, SEBARCHIEVICI C. Review of solar refrigeration and cooling system [J]. Energy and Buildings, 2013, 67 (12): 286 – 297.

[2] 彭波峰,徐洪涛,张瑞月,等. 太阳能热水锅炉的节能潜力和能耗分析[J]. 热能动力工程,2018,33(11):124 – 129.
PENG Bo-feng, XU Hong-tao, ZHANG Rui-yue, et al. Energy saving potential and energy consumption analysis of solar hot water boilers [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018,33(11):124 – 129.

[3] 高鑫磊,由世俊,张 欢,等. 槽式太阳能新型腔式吸热器模拟和应用研究[J]. 太阳能学报,2019,40(10):2899 – 2904.
GAO Xin-lei, YOU Shi-jun, ZHANG Huan, et al. Simulation and application study of novel cavity receiver for parabolic trough collector [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40 (10): 2899 – 2904.

[4] 汪德良,张 纯,杨 玉,等. 基于太阳能光热发电的热化学储能体系研究进展[J]. 热力发电,2019,48(7):1 – 9.
WANG De-liang, ZHANG Chun, YANG Yu, et al. Research process of thermochemical energy storage system based on solar thermal power generation [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(7):1 – 9.

[5] 王永川,陈光明,张海峰,等. 相变储能材料及其实际应用[J]. 热力发电,2004,33(11):10 – 13.
WANG Yong-chuan, CHEN Guang-ming, ZHANG Hai-feng, et al. Phase change energy storing materials and practical application thereof[J]. Thermal Power Generation, 2004, 33(11):10 – 13.

[6] 李 传,孙 泽,丁玉龙. 高温填充床相变储热球的储热特性[J]. 储能科学与技术,2013,2(5):480 – 485.
LI Chuan, SUN Ze, DING Yu-long. A numerical investigation into the charge behaviour of a spherical phase change material particle for high temperature thermal energy storage in packed beds[J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(5):480 – 485.

[7] PANESI R. Experimental study using different heat transfer fluid of a packed bed thermal energy storage system during charging process[J]. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2018, 16(3):173 – 177.

[8] ABDEL-REHIM Z S. Heat transfer analysis of a packed bed-PCM capsules latent heat thermal energy storage system [J]. Energy

Sources, Part A: Recovery, Utlization, and Environmental Effects, 2011, 33(13/16): 1326 – 1343.

[9] LIAO Z R, CHAO R, et al. A novel effective thermal conductivity correlation of the PCM melting in spherical PCM encapsulation for the packed bed TES system[J]. Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics, 2018, 135: 116 – 122.

[10] IZQUIERDO B M A, SOBRINO C, ALMENDROS I, et al. Thermal energy storage in a fluidized bed of PCM [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 230: 573 – 583.

[11] DZIKEVICS M, ZANDECKIS A. Mathematical model of packed bed solar thermal energy storage simulation[J]. Energy Procedia, 2015, 72: 95 – 102.

[12] 刘钟泽. 封装球形相变胶囊的填充床储热特性数值模拟研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.
LIU Zhong-ze. Numerical simulation research on thermal energy storage characteristics of packed bed with spherical phase change capsules[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2021.

[13] 张　颖. 太阳能热水供暖 PCM 蓄放热装置热工特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
ZHANG Ying. Study on dynamic thermal performance of PCM heat storage device in the solar water heating system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.

[14] PENG Hao, DONG Hui-hua, LING Xiang. Thermal investigation of PCM-based high temperature thermal energy storage in packed bed [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 81: 420 – 427.

[15] ERGUN S. Fluid flow through packed columns[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1952, 48(2): 89 – 94.

[16] BANNACH N. Packed bed latent heat storage. http://cn.comsol.com/model/packed-bed-latent-heatstorage – 76181.

[17] 李文华, 鲍　听, 沈　利, 等. 管式 GGH 蒸汽吹灰器改造数值模拟及工程验证[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 118 – 123.
LI Wen-hua, BAO Ting, SHEN Li, et al. Numerical simulation and practical verification of soot-blowing system retrofitting for tubular gas-gas heater [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 118 – 123.

[18] 韩中合, 王晓帅. 弓形截面柱状相变储热装置热性能数值模拟[J]. 热力发电, 2022, 51(3): 29 – 35.
HAN Zhong-he, WANG Xiao-shuai. Numerical study on thermal performance of cylindrical phase change heat storage device with bow section [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51 (3): 29 – 35.

[19] 车德勇, 沈　辉, 蒋文强, 等. 太阳能热发电机组蓄热堆积床放热性能数值模拟[J]. 热力发电, 2015, 44(8): 14 – 20.
CHE De-yong, SHEN Hui, JIANG Wen-qiang, et al. Numerical simulation on dynamic discharging performance of packed bed using heat storage capsules[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(8): 14 – 20.

[20] 郭茶秀, 张务军, 魏新利. 新型高温潜热储能系统的性能研究[J]. 热力发电, 2007, 36(7): 13 – 20.
GUO Cha-xiu, ZHANG Wu-jun, WEI Xin-li. Study on performance of a new type high-temperature latent-heat thermal energy storage system [J]. Thermal Power Generation, 2007, 36 (7): 13 – 20.

[21] WAKAO N, KAGUEI S, FUNAZKRI T. Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid heat transfer coefficients in packed beds [J]. Chemical Engineering Science, 1979, 34 (3): 325 – 336.

[22] 徐桂芝, 胡　晓, 金　翼, 等. 高温相变储热换热装置仿真建模及分析[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(2): 338 – 346.
XU Gui-zhi, HU Xiao, JIN Yi, et al. Simulation modeling and analysis of a high temperature phase change heat storage and exchange device [J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(2): 338 – 346.

[23] ANDREOZZI A, BUONOMO B, MANCA O, et al. Thermal energy storages analysis for high temperature in air solar systems[J]. Applied Thermal Energying, 2014, 71(1): 130 – 141.

[24] SRIKANTH O, KHIVSARA S D, ASWATHI R, et al. Numerical and experimental evaluation of ceramic honeycombs for thermal energy storage[J]. Transactions of the Indian Ceramic Society, 2017, 76(1/4): 102 – 107.

[25] 杨亚帅. 基于太阳能供暖系统的相变蓄热材料研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
YANG Ya-shuai. Research on phase change heat storage materials based on solar heating system[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017.

(丛　敏　编辑)