

球形相变储能单元填充床瞬态传热特性数值研究

兰 健, 郭雪岩

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2022年2月24日; 录用日期: 2022年3月14日; 发布日期: 2022年3月23日

摘 要

填充床储热装置作为储能子系统广泛应用于诸如光热电站等能源系统。本文采用数值模拟方法对不同结构的球形储能单元构成的填充床储热装置的瞬态传热特性进行了研究。使用的球形储能单元包括光滑球体、表面带凹坑球体和带贯穿孔洞球体, 研究发现穿孔小球的储热性能优势明显。基于带孔小球储能单元比较分析了相变材料以及非相变材料组成的储能填充床的储能性能, 研究结果表明相变材料的潜热明显提高了储能量。本文也研究了储能单元孔径、传热介质入口温度和储能材料潜热值对储热性能的影响。

关键词

储能, 填充床, 穿孔球, 相变材料

Numerical Study on Transient Heat Transfer Characteristics of Packed Beds of Spherical Phase Change Energy Storage Elements

Jian Lan, Xueyan Guo

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 24th, 2022; accepted: Mar. 14th, 2022; published: Mar. 23rd, 2022

Abstract

Packed bed based heat storage devices are widely utilized as energy storage subsystem in energy systems such as solar thermal power stations. In this work, transient heat transfer characteristics of heat storage packed beds of spherical energy storage elements were numerically investigated. The

utilized spherical energy storage elements include smooth spheres, grooved spheres and spheres with holes. It has been found that heat storage performance of the packed beds of spheres with holes is obviously better than that of the other two types. Heat storage performance of packed beds of phase change material elements was compared with that of beds with non-phase-change elements based on spheres with holes. The results indicate that the latent heat obviously enhances the heat storage. Influences of hole size of spheres, inlet temperature of fluid and latent heat of heat storage materials on heat storage performance were also studied in this paper.

Keywords

Energy Storage, Packed Bed, Sphere with Holes, Phase Change Material

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着世界能源危机的出现,人们逐渐将目光投向了可再生能源。可再生能源,如太阳能、水能、地热能等,在自然界中是一种可以循环利用的能源[1][2]。太阳能是一种来源广泛、环保的可再生能源。所以,对于太阳能利用的研究发展迅速。太阳能的主要利用类型为聚光太阳能(CSP)和光伏(PV)。其中,聚光太阳能技术更适合集成到电网中。但是,聚光太阳能系统有着不稳定性和间歇性的劣势,为了弥补这种劣势,储能系统应运而生。把储能系统集成到聚光太阳能系统中能够显著提高其稳定性以及能量利用效率[3][4]。

储能填充床一般由换热流体与储能单元两部分组成,这两部分共同发挥储能的作用。在换热流体方面[5]-[10],因熔盐具有比热容大、流动性能好、热稳定性强、使用的温度范围广、成本相对较低的特点,其中高温填充床储能领域被认为是现阶段最佳换热流体之一。

在储能单元方面,考虑到经济性因素,有学者[11][12][13]使用石英岩作为储能单元,由于石英岩的尺寸较大,从而使得整个储能填充床空隙率较大,进而储能效率不佳。于是有学者[14]以颗粒较小的砂石作为储能单元,但又产生了新的问题。砂石所组成的填充床空隙率过小,阻碍流体在储能床中的流动,从而大大增加了换热时间。Odenthal等[15]将大颗粒的石英岩和小颗粒的砂石混合作为储能材料,通过小颗粒的砂石来填补大颗粒石英岩所造成的空隙,使得空隙率适中,得到了较好的储能效率。有研究人员[16]制作球形储能单元,进一步缩短流动时间。但其没有考虑到在相同条件下,流动时间小到一定程度后会导致流体与储能单元之间无法充分换热,进而影响其性能。Gautam等[17]以球体为原型,在球体的三个方向上做凹槽,每个方向两个。由于流动流体中产生的涡流对传热速率有影响。球形填料表面的凹槽破坏了层流底层,提高了填料与流体之间的传热速率。通过这种结构改变换热流体的流动状态,从而提高流体与储能单元间的换热效率,进而提升储能填充床性能。考虑到潜热储能的储能密度大, Yang 和 Cai [18]分别将陶瓷(非相变材料)和 NaNO_2 (相变材料)作为储能单元材料进行相关研究。相关结果表明在相同工况下,相变材料的储热量远大于非相变材料,但同时换热时间也大大增加。单一相变材料的物性参数具有局限性, Zhao 等[19]将填充材料分为高温相变材料、固体填充层(非相变材料)、低温相变材料三层。这样一来,可通过改变三层的比例来实现不同的储能单元物性参数。

本研究建立了一种高温熔盐储能填充床系统的三维几何模型,提出一种穿孔球的储能单元结构,将该结构与常规小球以及 Gautam 等[17]的模型进行对比,同时用该结构进行了显热储能与潜热储能的对比。并利用数值模拟对其性能进行了详细的研究。

2. 物理及数学模型

2.1. 物理模型

本研究采用管径 $D = 30\text{ mm}$ 的圆管作为填充床, 在填充床内用储能单元随机填充 100 mm 的长度。随机填充的方法参考 Partopour [20]提出的算法。如图 1 所示, 整个填充床总长度为 150 mm , 为了消除进出口效应对储能填充床的影响, 在进出口分别预留了 30 mm 和 20 mm 的长度。在生成填充床的物理模型时, 储能单元人工制造了 1% 的间隙以减小网格量。由于填充床内储能单元较多, 填充床的内部结构复杂, 本文使用多面体网格, 其对于复杂的结构具有较好的适应性。多面体网格除了能够适应复杂结构外, 多面体网格在相同的结构下网格数量明显小于传统四面体网格, 从而大大减小了计算时间, 网格如图 2 所示。本研究主要采用结构为球、带凹槽的小球(Gautam 等的模型)、带孔小球。本文中相变模型采用凝固与熔化模型, 该模型假设相变储能单元由固体非相变材料(本文为陶瓷)包裹, 陶瓷厚度忽略不计, 陶瓷为非相变材料, 在整个换热过程中不会发生熔化, 因此熔化后的相变材料不会与换热流体发生混合, 图 3 展示了三种结构的填充床的堆积模型, 从左至右依次为实心球、凹槽球、穿孔球, 其中穿孔球即在 Gautam 等人的基础上, 将其结构中的凹槽贯穿。球的直径均为 6 mm , 孔半径均为 1 mm , 凹槽球的槽深为 1 mm 。



Figure 1. Packed bed geometric model
图 1. 填充床几何模型

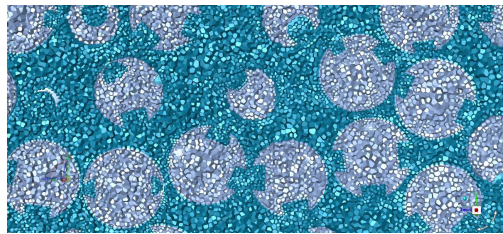


Figure 2. Local enlargement of grid
图 2. 网格局部

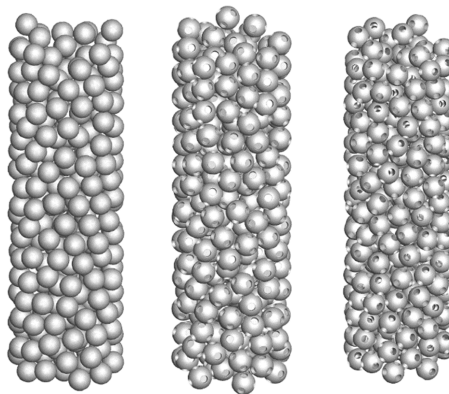


Figure 3. Packed bed accumulation model (from left to right: spheres, grooves-spheres, and holes-spheres)
图 3. 填充床堆积模型(从左至右依次为实心球、凹槽球、穿孔球)

2.2. 数学模型

在本研究的数值模拟中, 采用 ANSYS Fluent 作为求解器, 由于填充床内部结构复杂, 为了得到准确的流场, 内部的流动细节不能被忽略, 故湍流模型采用 $k-\omega$ SST 模型, 压力速度耦合使用 SIMPLE 算法二阶离散格式。入口边界条件为速度入口, 出口边界条件为压力出口, 填充床的圆柱面设置为绝热壁面。表 1 列出本研究所使用材料的物性参数。其中, 采用熔盐作为换热流体, 三元熔盐作为储能单元内部填充的相变材料。根据太阳能热电厂储能系统的优化温度范围, 相变材料是由 Li_2CO_3 、 K_2CO_3 、 Na_2CO_3 分别以 32%、35%、33% 的质量分数混合而成三元熔盐, 相变温度为 668.1 K [21]。

Table 1. Material physical parameters

表 1. 材料物性参数

材料	密度 ρ (kg/m ³)	比热容 C_p (J/kg·K)	导热系数 λ (W/m·K)	粘度 μ (Pa·s)	潜热(kJ/kg)
熔盐[18]	1865	1510	0.571	3.22×10^{-3}	/
陶瓷[18]	2000	1500	1	/	/
三元熔盐[20]	2310	1540	1.69	/	273

计算过程中涉及方程如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

其中, ρ 为密度, t 为时间, u_i 为速度分量。

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S \quad (2)$$

其中, u_i, u_j 为速度分量, x_i, x_j 为空间里不同方向的分量, S 为源项, 其包括质量力、体积力等, τ_{ij} 为应力张量, 其具体表达式为:

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3)$$

其中, μ 为动力粘度, δ_{ij} 为正应力张量。

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial[u_i(\rho E + p)]}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j \tau_{ij} \right) + Q \quad (4)$$

其中, T 为温度, λ 为有效导热系数, Q 为热源项, 其中

$$E = c_p T + \frac{1}{2} u_i^2 \quad (5)$$

其中, c_p 为比热容。

在凝固与熔化模型中, 材料的焓值计算为显焓和潜焓之和:

$$H = h + \Delta H \quad (6)$$

其中:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \tag{7}$$

$$\Delta H = \beta L \tag{8}$$

其中 h_{ref} 为参考焓值, T_{ref} 为参考温度, c_p 为定压比热容, L 为材料的潜热值, β 为液相分数, 其表达式为:

$$\beta = 0(T < T_s) \tag{9.a}$$

$$\beta = 1(T > T_l) \tag{9.b}$$

$$\beta = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} (T_s < T < T_l) \tag{9.c}$$

其中 T_s 为材料的凝固温度, T_l 为材料的熔化温度。

2.3. 数值模型验证

使用球体周围对流换热关联式对流动求解器进行验证, 以单个小球为例, 在雷诺数为 1~150 范围内, 将带孔小球周围的平均努塞尔数与 Whitaker [22]的关联式进行对比, 其中关联式如式(10)所示, 平均努塞尔数计算公式如式(11)所示, 其中雷诺数以等效直径 5.082 mm 来计算。图 4 表明本研究的数值解与修正值的差别。由于本研究结构与球体不同, 使得数值解普遍高于修正值, 这突出了带孔小球结构上的优越性。

$$Nu_m = 2 + (0.4Re^{1/2} + 0.06Re^{2/3}) Pr^{0.4} \left(\frac{\mu_\infty}{\mu_0} \right)^{1/4} \tag{10}$$

$$Nu = \frac{hd}{\lambda} \tag{11}$$

其中 h 为对流换热系数, d 为等效球直径, λ 为相变材料导热系数。

$$h = \frac{Q}{A\Delta T} \tag{12}$$

其中, Q 为单个小球与换热流体间的换热量, A 为小球的表面积, ΔT 为换热温差。

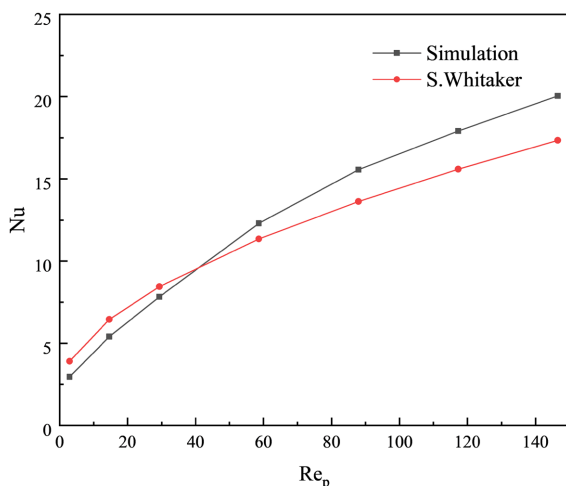


Figure 4. Single particle verification of the relationship between Nusselt number and Reynolds number
图 4. 努塞尔数与雷诺数的关系的单颗粒验证

在数值模拟过程中, 储能过程是由左向右的, 当储能单元出口位置的温度比填充床入口温度低 1 K 时, 认为储能过程结束。同样的, 放能过程是由右向左的, 当入口位置的储能单元温度高于填充床出口温度高 1 K 时, 认为放能过程结束。储能填充床所吸收/释放能量为填充床进出的热通量绝对值的差值。

3. 结果与讨论

3.1. 储能单元在储放能过程温度变化规律

在储能过程中, 填充床初始温度为 573 K, 入口温度为 773 K。入口速度为 0.001 m/s。在放能过程中, 入口温度为 573 K, 入口速度也为 0.001 m/s。图 5(a)显示了不同轴向位置带孔储能单元温度随时间的变化。可以看出, 在储能过程中, 带孔储能单元由左往右熔化。储能结束时间为 278.43 s。每个储能单元的储能过程包括固体显热吸热、相变潜热储热、液体显热吸热三个阶段。以填充床中部的储能单元($z = 80$ mm 处)为例, 储能过程分为三个阶段。首先, 固体显热吸热阶段为前 100 s, 固体吸收热量后温度迅速升高; 相变潜热储热过程约为 100~120 s, 相变潜热吸收大量热量, 温度升高幅度不大; 第三阶段, 液体显热吸热在 120~170 s, 相变材料完全熔化并且持续的吸收热量, 使得温度急剧升高。储能过程结束后, 储能单元温度保持在 773 K。储能单元放能过程是由右往左凝固。该过程与储能过程类似。从图中可以看出, $z = 40$ mm 和 $z = 120$ mm 处的储能单元分别在储能、放能过程相变潜热阶段相对于其他位置不是很明显, 是因为这两个位置在相应的过程中都处在换热流体的入口附近, 温差相对较大, 换热速率较快。

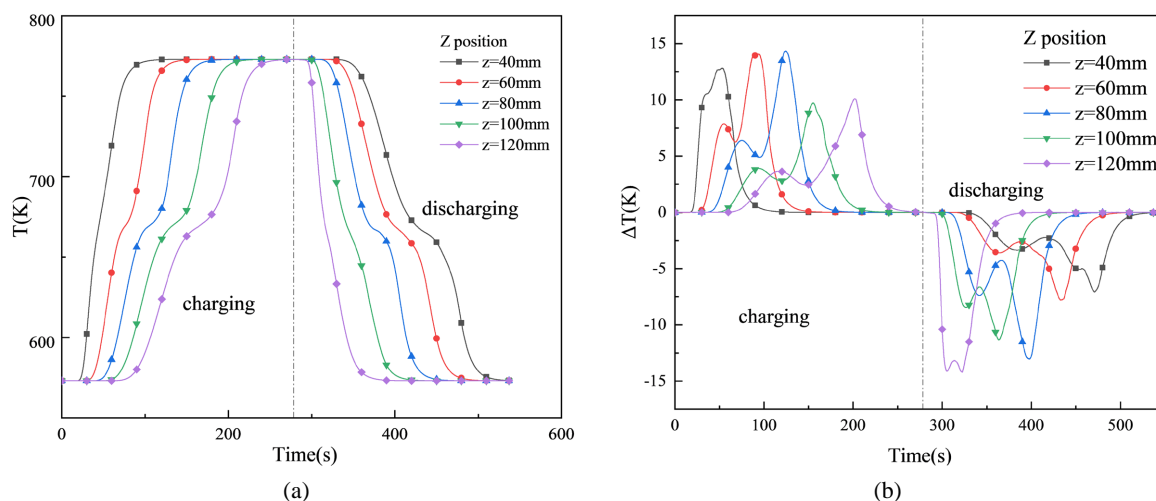


Figure 5. (a) The temperature of the energy storage unit at different axial positions changes with time; (b) The temperature difference between the heat exchange fluid and the energy storage unit at different axial positions changes with time

图 5. (a) 不同轴向位置储能单元温度随时间变化; (b) 不同轴向位置换热流体与储能单元温差随时间变化

图 5(b)为不同轴向位置换热流体与带孔储能单元温差随时间变化的曲线。首先, 在储能过程中, 可以看到, 换热流体和储能单元在不同位置的温差有两个波峰。第一个峰出现在固体显热的初始阶段。以 $z = 80$ mm 处的储能单元为例, 第一个峰的温差为 8 K 左右, 随着储能单元温度的逐渐升高, 温差逐渐变小。但由于储能单元在熔化过程中温度上升的速度较慢, 温差逐渐增大, 并且到达第二个温差峰值点, 约为 14 K。之后, 随着液体显热阶段的进行, 储能单元温度升高, 温差逐渐减小到 0 K。除此之外, 在放能阶段, 换热流体与储能单元在不同位置的温差也出现了两个峰值点, 第一个峰值点出现在液体显热阶段初期, 第二个峰值出现在相变潜热结束时。

3.2. 储能单元结构和物性对填充床性能的影响

储能单元作为主要储能物质, 其结构与材料将会直接影响储能填充床的性能。储能单元结构通过改变换热流体的流动状态来影响储能单元与换热流体间的换热效率, 进而影响储能填充床的性能; 另一方面, 储能单元的材料物性参数将会直接影响储能填充床的最大储能量。此处所采用的不同结构储能单元如图 3 所示。图 6(a)为不同结构储能单元以及储能单元相变与否的四种储能填充床在 $z = 80 \text{ mm}$ 处储能单元温度随时间的变化。图 6(b)为四种填充床的储能时间以及在储能时间所储存的能量。

首先, 三种相变填充床中球储存的能量最多, 带孔小球次之, 凹槽小球最少, 相应的, 储能时间也是如此, 但如果用储存的能量与时间的比值来表示储能速率, 带孔小球最高, 为 278.43 W , 球次之, 为 268.03 W , 最小的凹槽小球为 257.90 W 。结构同为带孔小球的相变与非相变填充床对比, 显热填充床完成储能所需时间较少, 但总储能相对也较低。主要原因为相变材料的潜热在相变的过程中会大大增加其储能能力。

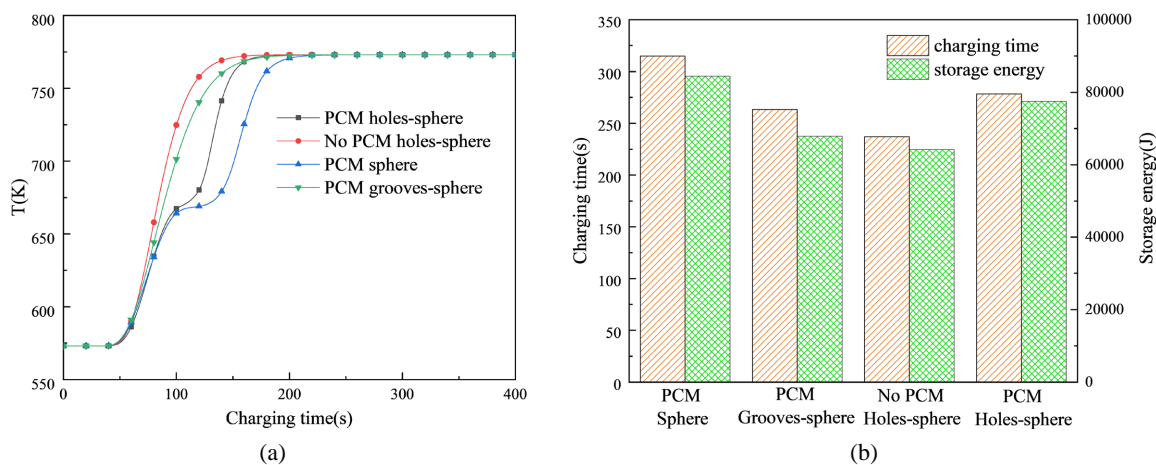


Figure 6. (a) The temperature of the energy storage unit changes with time at $z = 80 \text{ mm}$ for the four packed beds; (b) The energy storage time and energy storage for the four packed beds

图 6. (a) 四种填充床在 $z = 80 \text{ mm}$ 处储能单元温度随时间变化; (b) 四种填充床储能时间以及储能量

3.3. 换热流体入口参数对填充床性能影响

3.3.1. 换热流体入口速度对填充床性能的影响

入口速度的增大会增加雷诺数, 从而改善填充床的换热性能。图 7 展示了填充床的换热时间随入口速度的变化。从图中可以看出, 三种结构填充床的换热时间随着入口流速的增大而减少, 但三种结构填充床的减小幅度不同, 在相同流速下, 由球构成的填充床的时间最大。而对于其他两种填充床, 在低速时, 带槽小球的储能时间较短, 而随着流速的增大, 带孔小球与带槽小球的换热时间差逐渐变小, 最后在中高速工况下, 带孔小球的储能时间变为最短。但同时, 流速的增大意味着输送功率也会变大。此处, 用压降来衡量其输送功率。图 8 显示了压降随流速的变化。可以看出, 在相同速度下, 由球、带孔小球、带槽小球所构成的填充床压降依次增大。三种填充床压降随着流速的增大基本保持相同趋势增大。综合换热时间和压降来看, 带孔小球的具有明显优势。

同时我们取 $z = 80 \text{ mm}$ 处储能单元温度在不同流速下随时间变化, 如图 9。可以看出, 随着流速的增大, 换热速率迅速增加。当流速为 0.01 m/s 时, 储能单元的相变过程的温度变化已经不是很明显, 这是因为换热速率过大, 相变潜热过程迅速完成, 时间很短。

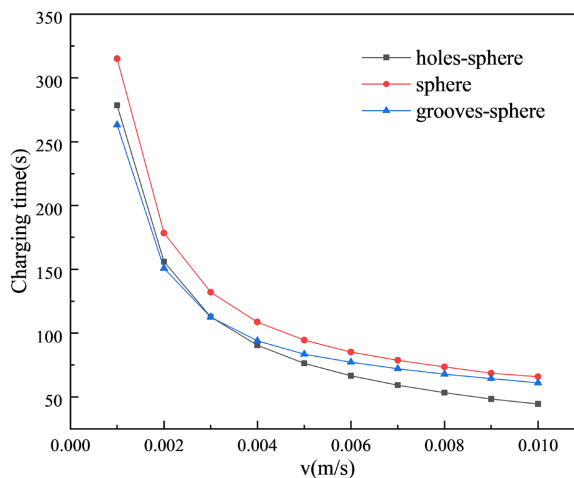


Figure 7. Influence of inlet velocity on energy storage time
图 7. 入口速度对储能时间的影响

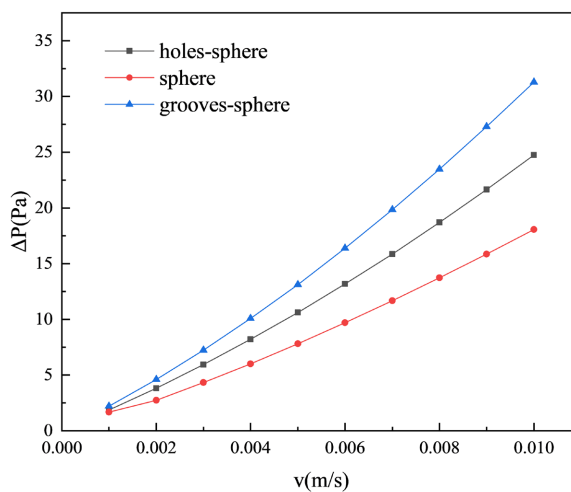


Figure 8. Influence of inlet velocity on pressure drop
图 8. 入口速度对压降的影响

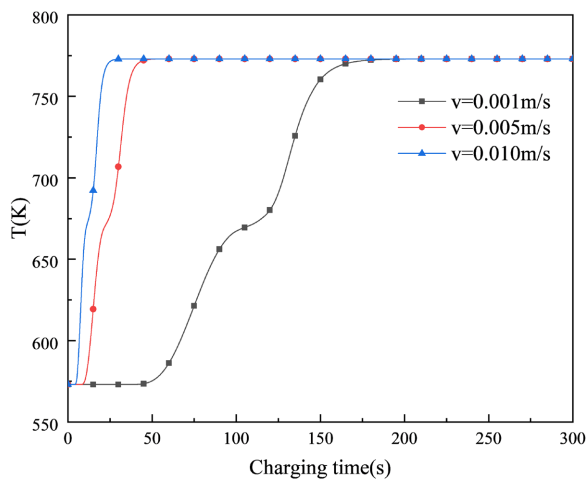


Figure 9. The temperature of the energy storage unit at $z = 80$ mm changes with time
图 9. $z = 80$ mm 处储能单元温度随时间变化

3.3.2. 换热流体入口温度对填充床性能的影响

本研究选取了 673 K、723 K、773 K 三种不同的入口温度，分析了入口温度对填充床的影响。储能过程初始温度为 573 K。图 10 展示了不同入口温度下填充床 $z = 80 \text{ mm}$ 处储能单元温度随时间变化、储能时间和储能量。可以看出，当入口温度从 673 K 升高到 723 K 时，由于温差的增大，储能量明显增加，储能时间略微增加，储能速率从 111.96 W 增加到 189.49 W，增加了 69.3%，当入口温度从 723 K 升高到 773 K，储能量增加，储能时间减少，储能速率从 189.49 W 增加到 278.43 W，增加了 46.9%。这是因为当入口温度升高时，换热流体与储能单元间的换热温差增大，而二者间的换热速率与温差成正比。

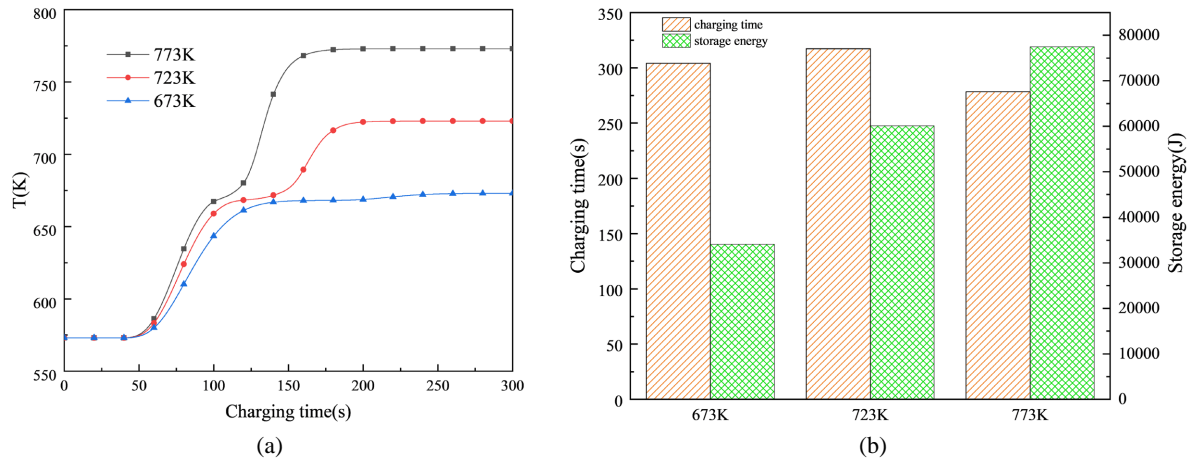


Figure 10. (a) The temperature of the energy storage unit at $z = 80 \text{ mm}$ varies with time at different inlet temperatures; (b) The energy storage time and energy storage of the packed bed at different inlet temperatures

图 10. (a) 不同入口温度下 $z = 80 \text{ mm}$ 处储能单元温度随时间变化; (b) 不同入口温度下填充床储能时间和储能

3.4. 相变材料潜热值对填充床性能的影响

相变材料的潜热值对填充床的性能起着重要作用。图 11(a)为不同潜热值下 $z = 80 \text{ mm}$ 处储能单元温度随时间的变化。与未使用相变材料的填充床相比，使用相变材料的填充床储能时间明显增加，从而增加了储能量。几种不同潜热值的相变材料相比，前段时间的温度基本相同。最大的差异是维持相变潜热

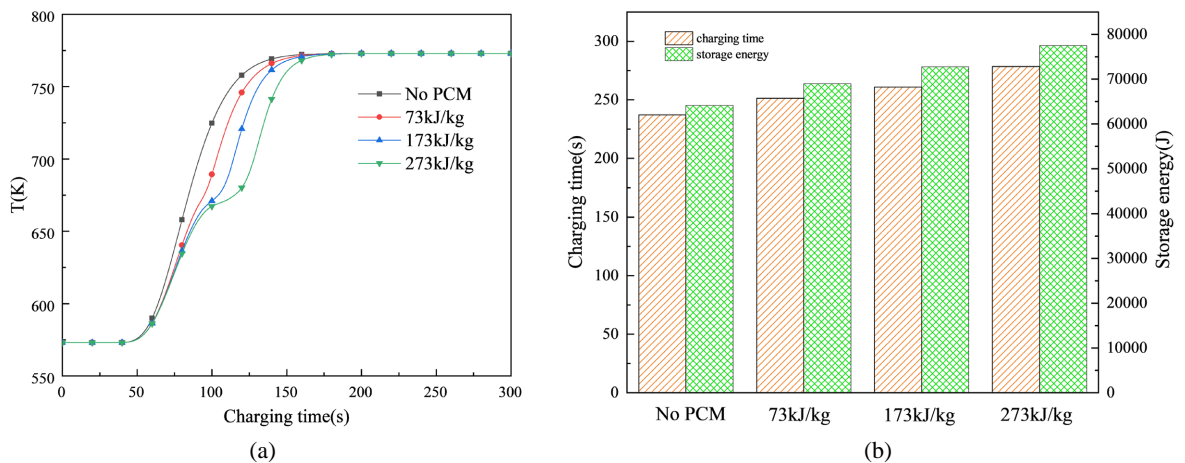


Figure 11. (a) The temperature of the energy storage unit at $z = 80 \text{ mm}$ at different latent heat values with time; (b) The energy storage time and energy storage of the packed bed under different latent heat values

图 11. (a) 不同潜热值下 $z = 80 \text{ mm}$ 处储能单元温度随时间的变化; (b) 不同潜热值下填充床储能时间和储能量

阶段所需的时间长短。在低潜热值材料中, 相变潜热阶段维持时间短, 使温度迅速到达入口温度。由于相变材料的吸热能力, 其高潜热值意味着需要较长的储能时间。

图 11(b)为不同潜热值下填充床储能时间和储能量。对于相变材料, 储能时间以及储存能量随潜热值增加而增加, 随着潜热值从 73 kJ/kg 增加到 273 kJ/kg, 储能量从 68,988.12 J 增加到 77,522.59 J, 储能时间从 251.37 s 增加到 278.43 s。综合来看, 潜热值从低到高四种填充床储能速率分别为: 270.58 W、274.45 W、278.94 W、278.43 W。与潜热储能系统相比, 显热储能系统完成储能时间更短, 但储能较少。主要原因是相变材料的潜热值在相变过程中会增加储能能力。

3.5. 带孔小球孔径对填充床性能的影响

带孔小球孔径的变化能够在不改变储能单元个数的情况下改变填充床的空隙率, 使其内部流场发生变化。我们研究孔半径分别为 0.5 mm、1 mm、1.5 mm 的带孔小球(球半径均为 3 mm)组成的填充床。图 12 展示了不同孔径填充床 $z = 80$ mm 处储能单元温度随时间变化、储能时间和储能量。三种填充床空隙率分别为: 0.63、0.74、0.87, 储能速率分别为 261.07 W、278.43 W、303.75 W。但三种填充床的储能量并没有与空隙率一一对应, 原因是相较于孔径为 0.5 mm 的填充床, 孔径为 1 mm 换热面积大, 换热速率高, 使得在储能截止时间时, 末段颗粒与出口之间的换热流体温度高于 0.5 mm 填充床, 致使 1 mm 填充床储能量大于 0.5 mm。相同的, 1.5 mm 填充床相对于 1 mm 也有这种效果, 但由于 1.5 mm 填充床中储能单元的体积占比过小, 这部分能量小于储能单元之间能量差, 使得 1.5 mm 填充床储能量还是小于 1 mm。在前 140 s 左右, 1 mm 填充床由于换热速率高, 前段的储能单元将换热流体的能量吸收的更多, 导致在 $z = 80$ mm 处的换热温差相较于 0.5 mm 填充床小, 使得该处储能单元前段时间升温较慢。过了这个时间点后, 前段储能单元均换热完全, 中段换热温差基本相同, 而孔径为 1 mm 的储能单元换热面积大的优势得以体现, 使得温度快速上升。

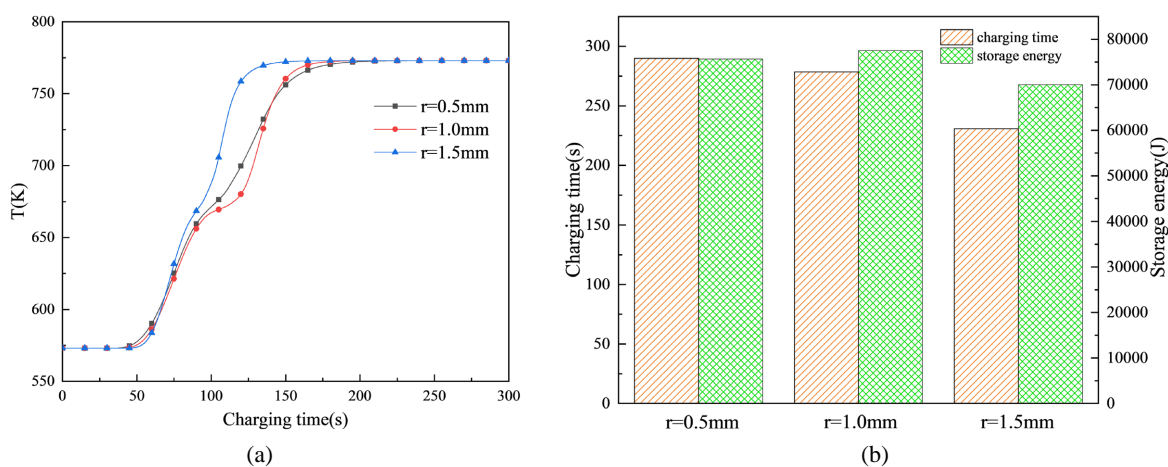


Figure 12. (a) The temperature of the energy storage unit at $z = 80$ mm varies with time under different pore diameters; (b) The energy storage time and energy storage of the packed bed under different pore diameters

图 12. (a) 不同孔径下 $z = 80$ mm 处储能单元温度随时间变化; (b) 不同孔径下填充床储能时间和储能量

4. 结论

本文提出了带孔小球储能单元, 并采用数值模拟方法对几种不同结构球形储能单元填充床进行了对比分析, 证明了带孔小球结构的优越性。对比了带孔小球储能单元填充床非相变(小球材料为陶瓷)与相变(小球材料为三元熔盐)情况下的蓄热能力, 并分析了换热流体的入口参数、相变材料潜热值和储能单元结

构对填充床储能的影响, 得出如下结论:

1) 在选用的陶瓷填充床和三元熔盐填充床中, 三元熔盐填充床的储能量比陶瓷填充床提高了 20.8%, 但是储能时间也增加了 17.4%, 综合两点考虑, 其储热速率提高了 2.9%。显然相变材料的潜热明显提高了填充床的储能量, 但同时也使得储能时间增加。

2) 对比实心球、凹槽球和穿孔球的表现, 从储能时间和压降两方面评价, 穿孔球的结构优势明显。对于换热流体的入口温度, 填充床的储能速率随着入口温度的增大而变快, 但随着初始温度的增大, 增大相同温差的入口温度, 储能速率增大效果逐渐减弱。

3) 随着相变材料潜热值的增加, 储能速率呈现出先增加后基本不变的趋势, 但储能量是一直增加的, 因此随着潜热值的增大, 填充床在储能速率不减的情况下储能量逐渐增大。对于穿孔球的孔径研究中, 随着孔径的增大, 储能速率逐渐增大。

参考文献

- [1] Guo, S.P., Liu, Q.B., Sun, J. and Jin, H.G. (2018) A Review on the Utilization of Hybrid Renewable Energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **91**, 1121-1147. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.105>
- [2] Mathiesen, B.V., Lund, H. and Karlsson, K. (2011) 100% Renewable Energy Systems, Climate Mitigation and Economic Growth. *Applied Energy*, **88**, 488-501. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.03.001>
- [3] Qiu, Y., Li, M.J., He, Y.L. and Tao, W.Q. (2017) Thermal Performance Analysis of a Parabolic Trough Solar Collector Using Supercritical CO₂ as Heat Transfer Fluid under Non-Uniform Solar Flux. *Applied Thermal Engineering*, **115**, 1255-1265. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.044>
- [4] Wu, M., Li, M.J., Xu, C., He, Y. and Tao, W. (2014) The Impact of Concrete Structure on the Thermal Performance of the Dual-Media Thermocline Thermal Storage Tank Using Concrete as the Solid Medium. *Applied Energy*, **113**, 1363-1371. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.044>
- [5] Pacheco, J.E., Showalter, S.K. and Kolb, W.J. (2002) Development of a Molten-Salt Thermocline Thermal Storage System for Parabolic trough Plants. *Journal of Solar Energy Engineering*, **124**, 153-159. <https://doi.org/10.1115/1.1464123>
- [6] Yang, X.P., Yang, X.X., Qin, F.G.F. and Jiang, R.H. (2016) Experimental Investigation of a Molten Salt Thermocline Storage Tank. *International Journal of Sustainable Energy*, **35**, 606-614. <https://doi.org/10.1080/14786451.2014.930465>
- [7] Hoffmann, J.F., Fasquelle, T., Goetz, V. and Py, X. (2016) A Thermocline Thermal Energy Storage System with Filler Materials for Concentrated Solar Power Plants: Experimental Data and Numerical Model Sensitivity to Different Experimental Tank Scales. *Applied Thermal Engineering*, **100**, 753-761. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.110>
- [8] Zanganeh, G., Pedretti, A., Zavattoni, S., Barbato, M. and Steinfeld, A. (2012) Packed-Bed Thermal Storage for Concentrated Solar Power—Pilot-Scale Demonstration and Industrial-Scale Design. *Solar Energy*, **86**, 3084-3098. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.019>
- [9] Bellan, S., Alam, T.E., González-Aguilar, J., Romero, M., Rahman, M.M., Yogi Goswami, D., et al. (2015) Numerical and Experimental Studies on Heat Transfer Characteristics of Thermal Energy Storage System Packed with Molten Salt PCM Capsules. *Applied Thermal Engineering*, **90**, 970-979. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.056>
- [10] 杨小平, 杨晓西, 丁静, 徐勇军, 杨敏林, 蒋润花. 高温填充床蓄热过程传热特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(3): 529-532.
- [11] Erregueragui, Z., Boutammachte, N., Bouatem, A., Merroun, O. and Moukhtar Zemmouri, E.L. (2016) Packed-Bed Thermal Energy Storage Analysis: Quartzite and Palm-Oil Performance. *Energy Procedia*, **99**, 370-379. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.127>
- [12] Singh, S., Sørensen, K., Condra, T., Søndergaard Batz, S. and Kristensen, K. (2019) Investigation on Transient Performance of a Large-Scale Packed-Bed Thermal Energy Storage. *Applied Energy*, **239**, 1114-1129. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.260>
- [13] Niedermeier, K., Marocco, L., Flesch, J., Mohan, G., Coventry, J. and Wetzel, T. (2018) Performance of Molten Sodium vs. Molten Salts in a Packed Bed Thermal Energy Storage. *Applied Thermal Engineering*, **141**, 368-377. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.080>
- [14] Ortega-Fernández, I., Zavattoni, S.A., Rodríguez-Aseguinolaza, J., D'Aguanno, B. and Barbato, M.C. (2017) Analysis

- of an Integrated Packed Bed Thermal Energy Storage System for Heat Recovery in Compressed Air Energy Storage Technology. *Applied Energy*, **205**, 280-293. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.039>
- [15] Odenthal, C., Klasing, F. and Bauer, T. (2019) A Three-Equation Thermocline Thermal Energy Storage Model for Bi-disperse Packed Beds. *Solar Energy*, **191**, 410-419. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.005>
- [16] Abdulla, A. and Reddy, K.S. (2017) Effect of Operating Parameters on Thermal Performance of Molten Salt Packed-Bed Thermocline Thermal Energy Storage System Forconcentrating Solar Power Plants. *International Journal of Thermal Sciences*, **121**, 30-44. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.07.004>
- [17] Gautam, A. and Saini, R.P. (2020) Experimental Investigation of Heat Transfer and Fluid Flow Behavior of Packed Bed Solar Thermal Energy Storage System Having Spheres as Packing Element with Pores. *Solar Energy*, **204**, 530-541. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.024>
- [18] Yang, X.P. and Cai, Z.D. (2019) An Analysis of a Packed Bed Thermal Energy Storage System Using Sensible Heat and Phase Change Materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **144**, Article ID: 118651. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118651>
- [19] Zhao, B.C., Cheng, M.S., Liu, C. and Dai, Z.M. (2018) System-Level Performance Optimization of Molten-Salt Packed-Bed Thermal Energy Storage for Concentrating Solar Power. *Applied Energy*, **226**, 225-239. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.081>
- [20] Partopour, B. and Dixon, A.G. (2016) Computationally Efficient Incorporation of Microkinetics into Resolved-Particle CFD Simulations of Fixed-Bed Reactors. *Computers and Chemical Engineering*, **88**, 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.02.015>
- [21] Li, M.J., Jin, B., Ma, Z. and Yuan, F. (2018) Experimental and Numerical Study on the Performance of a New High-Temperature Packed-Bed Thermal Energy Storage System with Macroencapsulation of Molten Salt Phase Change Material. *Applied Energy*, **221**, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.156>
- [22] Whitaker, S. (1972) Forced Convection Heat Transfer Correlations for Flow in Pipes, Past Flat Plates, Single Cylinders, Single Spheres, and For Flow in Packed Beds and Tube Bundles. *AIChE Journal*, **18**, 361-371. <https://doi.org/10.1002/aic.690180219>