



基于移动气流口的新型储热填充床动态特性分析

张 艳^{1,2,3,4}, 王 亮^{1,2,3,4}, 林曦鹏^{1,2,3,4}, 林 霖^{1,3,4}, 葛志伟^{1,3,4}, 张 双^{1,3,4}, 李文博^{1,3,4},
王珩沅^{1,3,4}, 陈海生^{1,2,3,4}

(¹中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³长时规模储能
重点实验室(中国科学院), 北京 100190; ⁴“压缩空气储能”北京市重点实验室, 北京 100190)

摘 要:为解决传统填充床储热系统出口温度非稳态波动问题,本研究提出一种基于移动气流口的新型储热填充床。该结构通过驱动气流进出口沿填充床纵向动态移动,实现了传热斜温层的准稳定推移,在高效率的同时使得储/释热过程中温度波动分别降低至 38.61% 和 28.66%,提高了出口气流能量品质与系统运行稳定性。针对该新型进出口移动式结构,本研究建立了新型填充床的非稳态换热模型,开展了连续储释热工况的三维动态数值仿真,探究了气流口移动方式、运行条件、材料等因素对新型填充床储热动态特性的作用机制。结果显示,本研究的填充床在长宽比为 4:1 时可平衡效率与稳定性;减小填充球粒径能提高效率,但不利于稳定性;对于本研究采用的长宽高比为 4:1:15、总体积 0.06 m³ 的填充床,在质量流量 0.007 kg/s、储/释热时间 6250 s 的运行条件下可满足热效率 95.76% 的稳定循环运行;93% 的进出口移动范围可改善温度“滞后”现象,提升填充床循环性能,使其以较低波动长期循环运行。本研究为大规模高温储热提供了新的技术路线与解决方案。

关键词: 填充床储热; 移动气流口; 热稳定性; 热效率; 焓效率

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0301

中图分类号: TK 121

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 08-3042-12

Dynamic characteristics analysis of a novel thermal energy storage packed bed based on a moving airflow inlet and outlet

ZHANG Yan^{1,2,3,4}, WANG Liang^{1,2,3,4}, LIN Xipeng^{1,2,3,4}, LIN Lin^{1,3,4}, GE Zhiwei^{1,3,4},
ZHANG Shuang^{1,3,4}, LI Wenbo^{1,3,4}, WANG Hengyuan^{1,3,4}, CHEN Haisheng^{1,2,3,4}

(¹Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Key Laboratory of Long-Duration and Large-Scale Energy Storage (Chinese Academy of Sciences), Beijing 100190, China; ⁴Beijing Key Laboratory of "Compressed Air Energy Storage", Beijing 100190, China)

Abstract: To address outlet temperature fluctuations in conventional packed-bed thermal energy storage (TES) systems, this study proposes a novel packed bed with moving inlet and outlet. By dynamically moving the inlet and outlet along the longitudinal direction, the system achieves quasi-stable thermocline motion. As a result, temperature fluctuations during the charging and discharging processes are reduced to 38.61% and 28.66%, respectively,

收稿日期: 2026-04-09; 修改稿日期: 2026-04-29。

基金项目: 国家自然科学基金(U25B6014), 中国科学院国际合作局对外合作重点项目资助(117GJHZ2023009MI)。

第一作者: 张艳(2002—), 女, 硕士研究生, 研究方向为填充床储热技术, E-mail: zhangyan@iet.cn; 通信作者: 王亮, 研究员, 研究方向为大规模储热储冷的基础研究及关键技术研发, E-mail: wangliang@iet.cn; 陈海生, 研究员, 研究方向为新型大规模储能技术, E-mail: chen_hs@mail.etp.ac.cn。

引用本文: 张艳, 王亮, 林曦鹏, 等. 基于移动气流口的新型储热填充床动态特性分析[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(8): 3042-3053.

Citation: ZHANG Yan, WANG Liang, LIN Xipeng, et al. Dynamic characteristics analysis of a novel thermal energy storage packed bed based on a moving airflow inlet and outlet[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(8): 3042-3053.

improving both outlet airflow quality and system stability. A transient heat transfer model was developed for the new packed bed, and three-dimensional dynamic numerical simulations were carried out under continuous charging and discharging conditions. The effects of inlet/outlet movement mode, operating conditions, and packing materials on dynamic thermal storage characteristics were systematically investigated. The results show that a packed bed with a 4 : 1 aspect ratio offers a favorable balance between efficiency and stability. Although reducing particle size improves efficiency, it also reduces system stability. For a packed bed with relative dimensions of 4 : 1 : 15 (length : width : height) and a total volume of 0.06 m³, stable cyclic operation with a 95.76% thermal efficiency was achieved at a 0.007 kg/s mass flow rate and 6250 s charging/discharging times. In addition, the 93% inlet and outlet movement range alleviates the temperature lag effect, enhances cyclic performance, and enables long-term operation with low fluctuations. This study provides a new technical route and theoretical basis for applying moving inlet and outlet packed beds in large-scale high-temperature TES systems.

Keywords: packed-bed thermal storage; moving airflow ports; thermal stability; thermal efficiency; exergy efficiency

“双碳”目标下, 可再生能源大规模发展, 但其存在间歇性、波动性、周期性、资源分配不均的问题, 针对这一现状, 储能技术的合理应用对降低能源消耗、减少碳排放起着关键作用。作为实现“双碳”目标和能源工业革命的关键支撑技术, 发展储能具有重大的战略意义^[1]。填充床储热作为一种利用储热材料的热容量进行储热的技术, 目前被广泛应用于热泵系统、太阳能利用和工业等领域。填充床储热或放热的过程中, 存在储能密度低、体积庞大、长时储存热损失大和输出温度波动等不足^[2], 原因是其内部会形成温度梯度, 随着传热介质的不断推移, 该斜温层沿填充床轴向会逐渐扩散, 影响填充床出口流体的稳定, 从而影响整体换热效率和热稳定性。

针对这些问题, 许多专家学者进行了不同角度的研究分析。填充床内部流动复杂, 传热机制十分复杂多样。Pacheco等^[3]最早提出了单罐斜温层储热系统的构想, 并通过实验验证了斜温层储热系统的可行性。在此基础上, 左远志^[4]经过实验研究发现采用多孔介质可以减小斜温层厚度, 强化换热。徐佳锟等^[5]建立了适用于蝶式太阳能热发电站的斜温层填充床储热系统的三维模型, 研究表明蓄放热过程中, 降低填料孔隙率、减小粒径、降低入口流速和蓄热温差可减小斜温层厚度。耿直等^[6]对单罐熔融盐蓄热装置的斜温层厚度进行数值模拟, 结果表明选用进口速度较小、进口温度较大的蓄热流体

或比热容较大、导热系数较小的多孔介质材料更有利于减小斜温层厚度, 提高蓄热效率。Lai等^[7]通过储热实验研究发现颗粒较小的填充床具有更好的温跃层特性, 不可逆损失较小。朱恂等^[8]和王小惠等^[9]分别通过实验和模拟研究出口温度与内部温度场变化规律, 发现填充床在储/放热过程中出口温度不稳定。Kothari等^[10]对空气填料床热能储存系统进行了实验, 验证了填料床系统在放热过程中的不稳定性。针对这一问题, 林曦鹏等^[11]设计了一种圆柱形出口温度连续稳定填充床储能装置, 通过填充床进口和出口的连续移动, 实现了出口温度的连续稳定, 能够提高系统效率和运行稳定性。

依据上述内容, 目前针对传统填充床储热器储/释热效率的改进大多针对储热材料的改进, 但不同材料适用范围不一, 普适性较差。故本研究从结构创新出发, 提出一种与文献[11]的结构和移动形式均不同的新型进出口移动式储热填充床, 研究了不同参数对填充床储热性能的影响, 探究其内部流动换热机理。

1 模型建立

1.1 物理模型

本研究提出如图1所示基于移动气流口的新型储热填充床设计, 改变传统填充床的固定进出口设计, 通过在填充床侧面设置可沿垂直方向移动的气

流口机构,实现气流进口与出口在运行过程中的动态位置调节。该物理模型主要由储热容器、填充球、左右集气腔、移动气流口组件及保温层几部分构成,其中填充床区域内部填充一定粒径的固体储热介质,移动气流口通过驱动装置可在预设轨道上连续移动,以改变气流在填充床内的流动路径和作用区域。模型的几何参数包括储热容器的直径与高度、移动气流口的移动范围及初始位置等,这些参数将作为后续性能分析的重要变量。

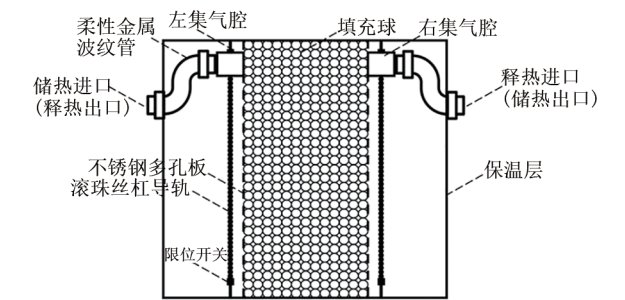


图 1 移动进出口的填充床结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the packed bed structure with mobile inlet and outlet

由于填充床内部包含复杂流动及换热,故本研究采用计算流体动力学(computational fluid dynamics,简称CFD)模拟内部实际的流体流动情况。本次模拟填充床储/释热运行过程的基础模型采用三维填充床储热器模型,考虑将气流进出口设计为沿垂直方向做上下匀速移动,储热过程中气流进出口由上至下运动,释热过程中进行反方向由下至上运动。模型的几何参数设置见表1,两过程模型示意图分别如图2、图3所示。

表 1 模型几何参数

Table 1 Model geometric parameters	
相关参数	参数设置
填充床高度 H/mm	1500
填充床长度 L/mm	400
填充床宽度 W/mm	100
气流进出口长度 l/mm	100
气流进出口宽度 w/mm	50
气流进出口高度 h/mm	50
填充介质直径 d_p/mm	5
填充介质孔隙率 ϵ	0.48

本研究选择空气作为填充床储热器中的传热流体,其热力学性质通过调用 NIST REFPROP 库^[12]

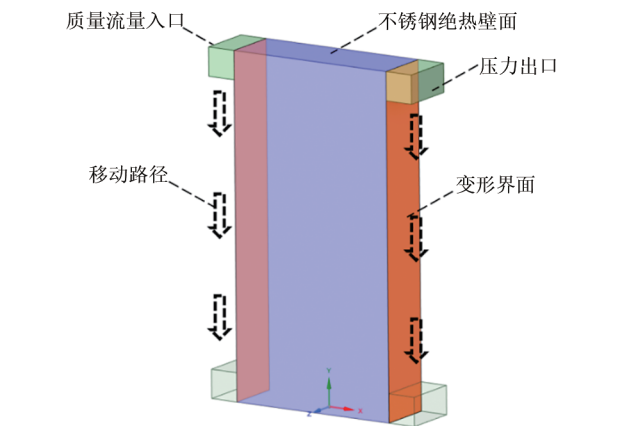


图 2 移动气流口的储热器储热过程模型示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the heat storage process model for a heat storage tank with a mobile airflow inlet and outlet

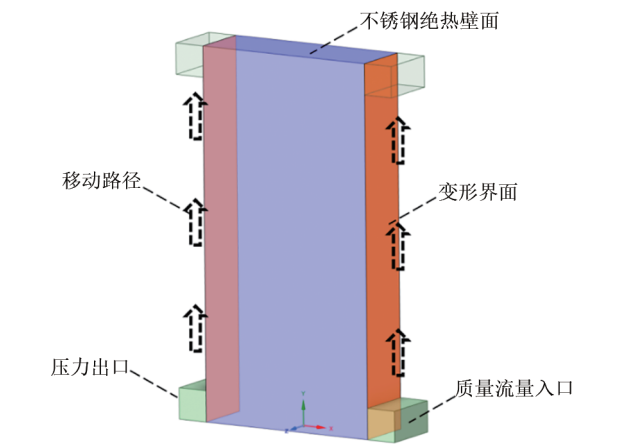


图 3 移动气流口的储热器释热过程模型示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the heat release process for a heat storage tank with a mobile airflow inlet and outlet

实时获取,以保证计算精度,且由于导热系数较小的材料完成储热过程的速率较快^[13],故储热器内部固体填充介质选择玄武岩^[14],填充床壁面采用不锈钢,并设置与外界绝热,材料具体热物性如表2所示。

表 2 材料热物性参数

Table 2 Thermophysical properties of the materials			
材料	密度/(kg/m^3)	比热容/[$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	导热系数/[$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
玄武岩 ^[14]	2825.2	1379.37	1.986
不锈钢	8030	0.157 (K)+462.93	16.27

在本研究所采用的变物性-非稳态-多孔介质流固换热模型中,流体热物性为变物性,随内部温度发生变化,由模型内部进行耦合计算。

针对上述移动气流口的填充床储热器模型, 为便于后续计算求解及性能分析, 对模型作出如下假设:

(1) 固体填充介质为连续、均匀的多孔介质, 且为等直径的球状物体;

(2) 内部填充介质的导热系数、密度和比热容等物性参数为常数, 不随温度变化而变化;

(3) 流体进出口以及多孔介质区域壁面均为不锈钢绝热壁面, 忽略散热损失。

1.2 数学模型

本填充床储热器模拟所采用的模型为变物性-非稳态-多孔介质流固换热模型, 针对本填充床储热器模型, 采用 Ergun 方程进行计算, 该方程的雷诺数适用范围较广, 也适用于多种填充物, 且其所处的速度段与实验值相差较小^[16], 该方程的计算式如式(1):

$$\frac{|\Delta P|}{H} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu_f v_f}{d_p^2} + 1.75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho_f v_f^2}{d_p} \quad (1)$$

式中, ΔP 为床层压降, Pa; H 为床层高度, m; ε 为孔隙率; d_p 为填充介质直径, m; μ_f 为流体的动力黏度, Pa·s; v_f 为流体的表观速度, m/s; ρ_f 为流体的密度, kg/m³。

固体多孔介质的能量方程如式(2):

$$\frac{\partial[(1-\varepsilon)(\rho c_p)_s T_s]}{\partial t} = \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) - h_v(T_s - T_f) \quad (2)$$

式中, 下标 s 表示固体填充介质, 下标 f 表示高温空气; k 表示导热率, W/(m·K); T 表示温度, K; h_v 表示填充床储热器内部单位体积中固体填充介质与高温空气之间的换热系数, W/(m²·K), 其计算式如式(3):

$$h_v = \frac{6(1-\varepsilon)k_s[2 + 1.1Re^{0.6}Pr^{1/3}]}{d_p^2} \quad (3)$$

式中, Re 为雷诺数, Pr 为普朗特数。

本研究基于 Ansys Fluent 软件, 离散化采用二阶迎风差分, 压力离散化采用 PRESTO! 方法, 时间步长间隔为 1 s, 连续性、速度和能量的收敛性判据为小于 1×10^{-3} 、 1×10^{-3} 和 1×10^{-6} 。

1.3 模型验证

针对本次采用的变物性-非稳态-多孔介质流固换热模型, 其参数与参考实验模型^[16]一致, 为直径 0.15 m、高度 1.2 m、孔隙率 0.4、以空气作为换热流体的圆柱体填充床, 验证本次计算模型及模拟方法结果, 分别记录换热流体与固体随填充床高度的

变化, 与实验结果进行对比, 如图 4 所示, 可看出模拟结果与实验结果^[16]的误差均在 5% 以内, 准确性较优, 本研究所采用的数学模型及计算方法较为准确, 可作为分析基础, 用于后续的计算。

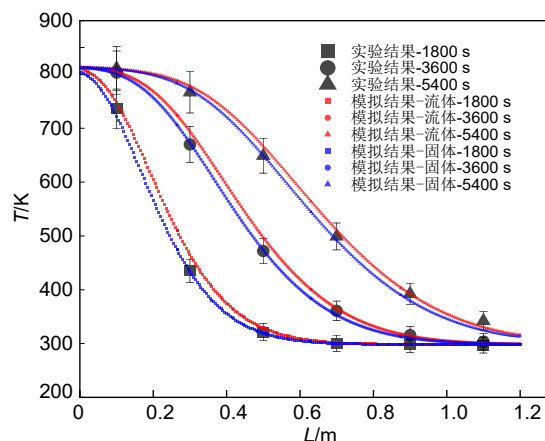


图 4 模型验证对比

Fig. 4 Comparison of the model validation

1.4 网格无关性验证

本次模拟中采用不同时间填充床不同位置处的温度对 CFD 网格进行无关性验证。本次验证采用对换热区域进行不同程度网格加密的方式生成 5 种不同数量的网格, 生成网格数量见表 3。

表 3 网格无关性验证

Table 3 Grid-independent verification

网格名称	M1	M2	M3	M4	M5
网格数量	484	19026	60500	123136	484000

对以上五种不同网格中, 三个不同储热时刻不同位置的温度分别进行模拟, 以填充床底部中心为原点, 具体监测时刻和位置坐标见表 4。

表 4 网格无关性验证监测点

Table 4 Grid-independent verification monitoring points

监测点	时刻	位置坐标
1	1000 s	(0, 1400, 0)
2	3000 s	(200, 900, 0)
3	6000 s	(0, 100, 0)

五种网格的模拟结果如图 5 所示, 可以看出, 网格数量为 484 和 19026 的温度随网格数量变化较大, 不能确保数值模拟的准确性; 当网格数量大于 60500 时, 温度变化稳定, 不随网格数量而发生大

幅变化,综合考虑模拟的计算精度及计算量,故本次模拟采用网格数量为 60500 的网格进行后续计算。

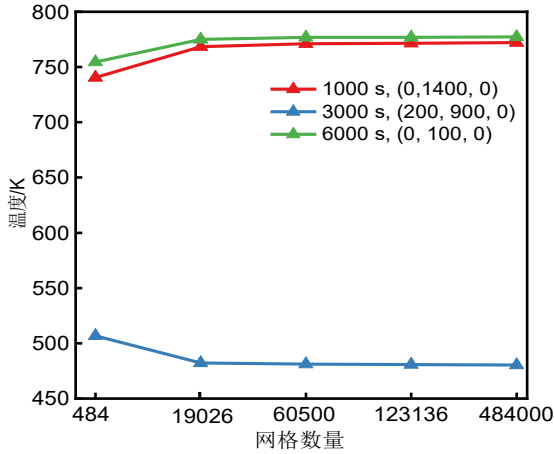


图 5 网格无关性验证结果

Fig. 5 Grid-independent verification results

1.5 性能评价指标

针对上述填充床储热器模型,对其性能评价可从以下角度考虑。

填充床运行过程中的焓损失主要来源于存储与释放过程中的有限换热温差与流动压降,针对储释热过程的性能量化评价,计算整体热效率和焓效率对其进行分析评价,其计算与分析过程如下:

储热过程中填充床吸收的总热量可用式(4)表示:

$$E_c = \int_0^{t_1} \dot{m} c_{p,f} [T_i - T_o(t)] dt \quad (4)$$

式中, E_c 为填充床储热过程吸收的总热量, J; t_1 为填充床储热结束时刻; $\dot{m}$ 为流体的瞬时质量流量, kg/s; T_i 为进口气流的温度, K; $T_o(t)$ 为随时间变化的出口气流温度, K。

释热过程中填充床释放的总热量表达式如式(5):

$$E_d = \int_{t_1}^{t_2} \dot{m} c_{p,f} [T_o(t) - T_i] dt \quad (5)$$

式中, E_d 为填充床释热过程中释放的总热量, J; t_2 为填充床释热结束时刻。

故填充床储-释热过程的热效率 η_1 可以用式(6)表示:

$$\eta_1 = \frac{E_c}{E_d} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{m} c_{p,f} [T_o(t) - T_i] dt}{\int_0^{t_1} \dot{m} c_{p,f} [T_i - T_o(t)] dt} \quad (6)$$

储热过程中填充床的总焓量如式(7):

$$Ex_c = \int_0^{t_1} \dot{m} \left\{ c_p \left[T_i - T_o(t) - T_{en} \ln \frac{T_i}{T_o(t)} \right] + RT_{en} \ln \frac{p_i}{p_o(t)} \right\} dt \quad (7)$$

式中, Ex_c 为储热过程中填充床的总焓量, J; R 为空气气体常数, 287 J/(kg·K); T_{en} 为环境温度, 300 K; s_i ; p_i 为进口压力, Pa; p_o 为随时间变化的出口压力, Pa。

填充床释热过程中释放的总焓量用式(8)表示:

$$Ex_d = \int_{t_1}^{t_2} \dot{m} \left\{ c_p \left[T_o(t) - T_i - T_{en} \ln \frac{T_o(t)}{T_i} \right] - RT_{en} \ln \frac{p_i}{p_o(t)} \right\} dt \quad (8)$$

式中, Ex_d 为释热过程中填充床释放的总焓量, J。

故填充床储-释热过程的焓效率 η_2 可用式(9)计算:

$$\eta_2 = \frac{Ex_c}{Ex_d} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{m} \left\{ c_p \left[T_o(t) - T_i - T_{en} \ln \frac{T_o(t)}{T_i} \right] - RT_{en} \ln \frac{p_i}{p_o(t)} \right\} dt}{\int_0^{t_1} \dot{m} \left\{ c_p \left[T_i - T_o(t) - T_{en} \ln \frac{T_i}{T_o(t)} \right] + RT_{en} \ln \frac{p_i}{p_o(t)} \right\} dt} \quad (9)$$

2 性能对比

经过对新型填充床模型进行储-释热过程的模拟,并对相关参数进行数据处理。图6所示为不同时刻的新型填充床的内部中轴面温度变化云图对比。

可以看出,储释热阶段,斜温层随储热器的出口移动位置而变化,该变化对填充床内部的温度分布起到均匀作用,有助于提高填充床出口温度的稳定性和温度水平,提高整体设备的热稳定性能。

为更准确地分析新型填充床的稳定性,将其计算结果与传统填充床进行对比,考虑便于进出口移动,新型填充床采用长方体结构,传统固定填充床仍采用圆柱体结构,在相同储释热时间、总体积及进口质量流量、相同填充材料的条件下,将该新型储热器的储-释热过程中填充床的出口温度进行记录并绘制曲线,与传统填充床的出口温度变化进行对比,如图7所示。

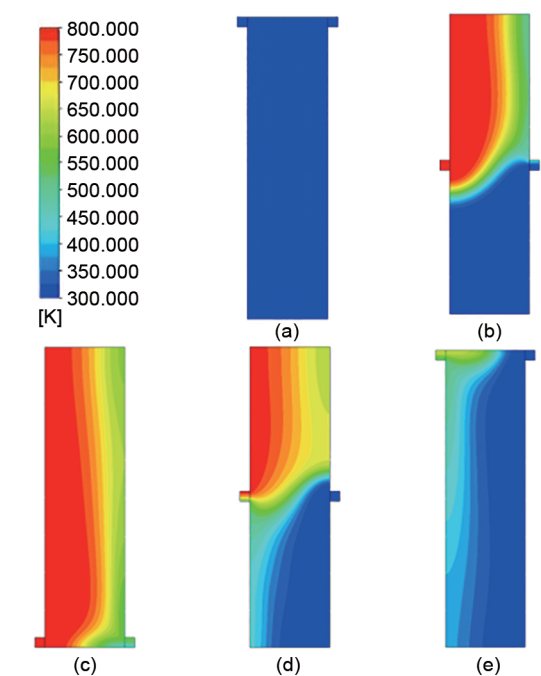


图 6 中轴面温度分布云图变化: (a) 储热初期; (b) 储热中期; (c) 储热末期/释热初期; (d) 释热中期; (e) 释热末期

Fig. 6 Changes in the temperature distribution contour plot along the central axis: (a) Early stage of heat storage; (b) Mid-stage of heat storage; (c) Late stage of heat storage/early stage of heat release; (d) Mid-stage of heat release; (e) Late stage of heat release

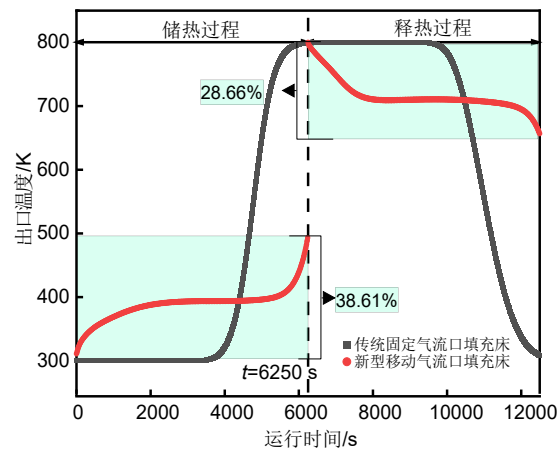


图 7 同运行时间下出口温度变化

Fig. 7 Changes in outlet temperature at the same operating time

由图 7 可以看出，在相同运行时间条件下，两种结构在出口温度的动态响应特性上表现出显著差异。储热初期阶段，新型填充床的出口温度出现小幅上升，传统填充床集中于储热末期的集中大幅突

升。随着低温气流持续进入，传统填充床在释热中后期温度骤降，热释放过程缺乏可控性，在新型填充床中，斜温层位置被动态锁定在出口附近，使得出口温度下降速率减缓，整体变化趋势更加平稳。

计算运行过程中出口温度的平均温度和出口温度区间在全温度范围（300~800 K）中占据的比例，数据见表 5。

表 5 出口温度性能表

Table 5 Outlet temperature performance table				
填充床	平均出口温度/K		出口温度区间占比/%	
	储热过程	释热过程	储热过程	释热过程
传统填充床	418.08	683.83	100	100
新型填充床	388.88	716.08	38.61	28.66

从表 5 中数据可以看出，在储热过程中，传统填充床的平均出口温度高于新型填充床，较高温度的热量并没有有效储存在填充床内部，被排出浪费；传统填充床在储热过程中出口温度区间占全温度范围（300~800 K）的 100%，波动范围极大，稳定性较差。新型填充床的出口温度波动区间占比仅为 38.61%，相比传统填充床降低了 61.39%，避免了传统填充床剧烈的温度起伏，体现了更优的储热阶段热稳定性。

释热阶段，新型填充床的平均出口温度达到 716.08 K，显著高于传统填充床，能够提供温度更高的输出气流，有利于提高能量利用的品质。同时，在出口温度波动区间占比上，传统填充床依旧为 100%，缺乏稳定性，新型填充床的波动温度区间占比降低至 28.66%，大幅提升了释热过程的热稳定性。

这种在运行过程中出口温度的高稳定性和平均温度，正是新型基于移动气流口的储热填充床在热稳定性方面相较于传统固定气流口填充床的显著优势，也是本模型在热稳定性方面的核心创新点。

为了深入对比新型填充床的热性能，分别计算上述两个模型的储热量、释热量以及热效率并进行对比，结果见表 6。

表 6 储热器热效率表

Table 6 Thermal efficiency of the heat storage tank			
模型	储热量/MJ	释热量/MJ	热效率
传统填充床	2499.36	2497.14	99.91%
新型填充床	2702.39	2693.09	99.66%

通过表6的对比发现,新型储热器在热效率方面与传统填充床差别不大,也能满足较高的热利用需求。然而,从储热量和释热量来看,新型填充床的储热量和释热量均较传统填充床高。这表明在相同的运行条件下,新型填充床能够存储和释放更多的热量,与传统填充床相比,进出口位置随运行过程沿床层轴向移动,使气流始终作用于温度梯度较大的区域,能够在一定程度上抑制斜温层的过度扩散,使得更多热量有效存储在填充床内部,提高床层的有效利用率,减少了高温气体提前排出和床层死区现象,从而提高了填充床的有效储热体积。因此,在相同结构尺寸和运行条件下,移动式进出口填充床表现出更高的储热能力,这对于提高整个储热系统的能量密度和运行经济性具有重要意义。

3 影响分析

3.1 填充床长宽比对储热性能的影响

建立填充床长宽比分别为1:1、4:1、16:1的模型,并保持总体积等其他参数不变,对三种模型进行储-释热过程的模拟,将计算结果进行下列分析对比。

不同长宽比的填充床,在保持高度恒定、储热时间一致、总质量流量相同的前提条件下,其出口温度随时间变化的曲线分布图如图8所示,计算上述不同模型的热效率及烟效率如图9所示。

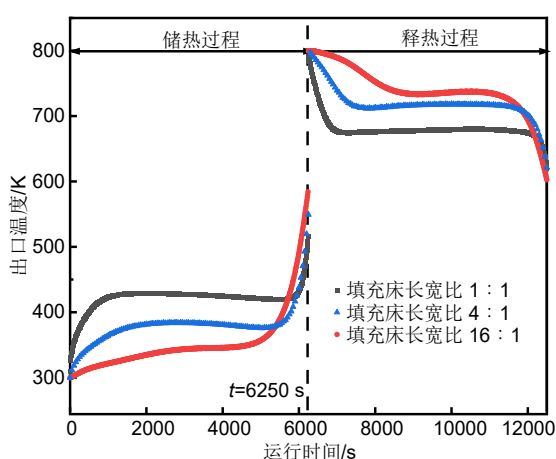


图8 填充床长宽比对出口温度的影响
Fig. 8 Effect of packing bed length-to-width ratio on outlet temperature

从图8中可以明显观察到,长宽比为1:1的填充床在整个储-释热过程中,稳定运行时间最长;

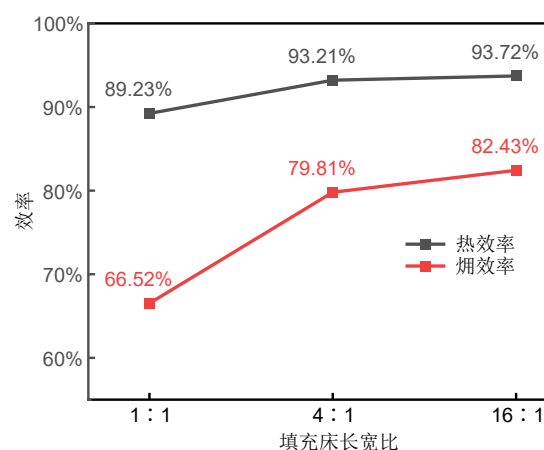


图9 填充床长宽比对效率的影响
Fig. 9 Effect of packing bed length-to-width ratio on efficiency

而长宽比为16:1的模型,稳定期过短,出口温度在储热后期快速上升,释热阶段呈现较大波动幅度。这一现象的产生与填充床内部流场分布密切相关:较小的长宽比使得气流在床层内的流动路径更均匀,斜温层扩展速度较慢;而较大的长宽比会导致气流速度梯度增大,高温区域集中在气流进口附近,斜温层扩展梯度增大,加剧出口温度波动。结合图9的曲线,随着长宽比的增大,热效率从89.23%增大至93.72%,这是由于较大的长宽比下,气流在填充床内的流动方向更接近一维流动,减少了横向混合造成的能量损失,热量利用率提升,但提升效果逐渐减弱;烟效率增长趋势变缓,在长宽比为16:1时达到82.43%,这是因为适度增加长宽比可优化流场均匀性,减少烟损失。综合出口温度稳定性、热效率及烟效率的变化规律来看,长宽比为4:1的填充床既能保证出口温度的平稳性,又能实现较高的能量转换效率。

3.2 质量流量对储热性能的影响

进口质量流量的大小直接影响气流与填充球之间的换热强度及床层内的温度场分布。为系统探究其影响规律,设计进口质量流量0.003~0.009 kg/s的七组模型,在相同体积及运行时间条件下,分析不同流量下储热与释热过程的动态特性。模拟结果监测如图10所示,结果显示,随质量流量的增大,储热阶段出口温度达到稳定的温度水平有所升高;释热阶段,出口温度的下降速率随流量增大先减缓后加快,整体温度波动幅度相应增加,在质量流量为0.007 kg/s时达到最高,稳定性也较好。

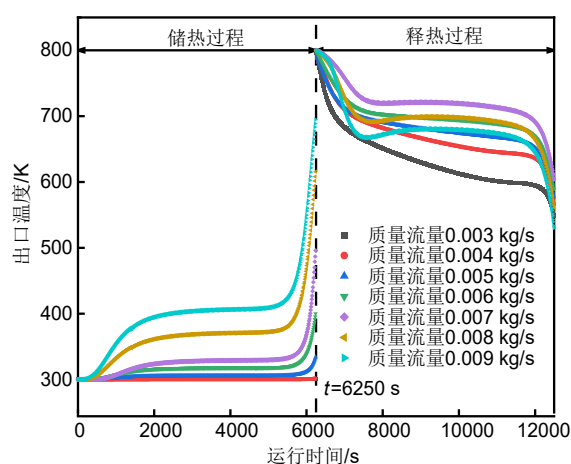


图 10 进口气流质量流量对出口温度的影响
Fig. 10 Effect of inlet gas flow rate on outlet temperature

对不同模型的热效率及焓效率进行计算, 结果如图 11 所示。可以看出, 热效率随质量流量的增大而增大, 是由于增加流量能够增强气流流速, 进而增大与填充球之间的对流换热强度, 促进热量在床层内的传递与存储; 焓效率均呈现先上升后下降的趋势, 在 0.007 kg/s 时增至 77.04%, 是因为当流量继续增大至 0.009 kg/s 时, 过高的流量使得气流在床层内的停留时间缩短, 高温气流与填充介质的换热不够充分, 部分热量未被有效存储便流出系统, 造成浪费。综合出口温度稳定性和效率变化特征, 进口质量流量为 0.007 kg/s 时, 填充床在储热性能与能量利用效率方面达到较好平衡, 既能保证较高的热效率和焓效率, 又能维持出口温度的相对稳定。

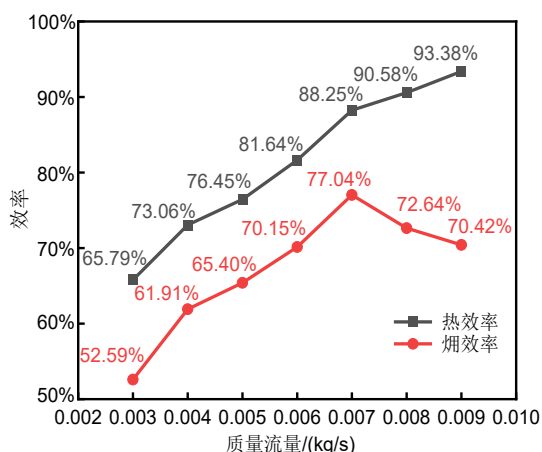


图 11 进口气流质量流量对效率的影响
Fig. 11 Effect of inlet gas flow rate on efficiency

3.3 填充球粒径对储热性能的影响

根据上述分析, 为探究填充球粒径对填充床性能的具体影响机制, 选取粒径分别为 3 mm、5 mm、6 mm、8 mm 的填充球进行模拟, 其余几何参数与边界条件保持一致, 运行结果如图 12 所示。

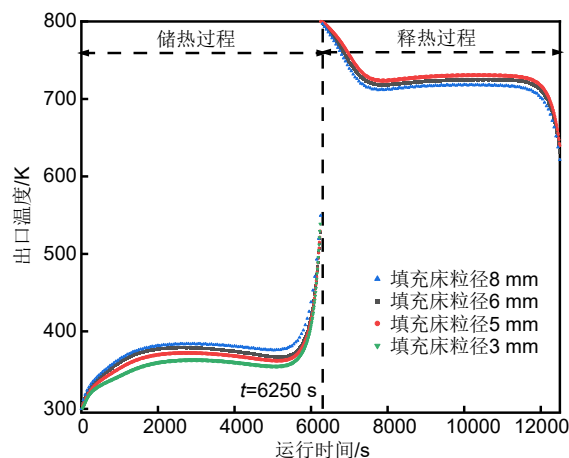


图 12 填充球粒径对出口温度的影响
Fig. 12 Effect of packing ball particle size on outlet temperature

图 12 曲线显示: 在该运行条件下, 填充球粒径越小, 储热过程出口温度越低, 释热过程出口温度越高, 但稳定性略有降低。小粒径的填充球具有更大的比表面积, 强化了对流换热效果, 储热阶段, 较小粒径的填充球能够更快地吸收热量, 更多的热量被存储在填充床内部, 释热阶段出口气流温度更高, 有利于提升释热品质; 但是过小的粒径也会带来一定的流动阻力增加, 从图中粒径 3 mm 的曲线细微波动可以观察到, 其温度稳定性相较于中等粒径略有降低, 这是由于小粒径填充球堆积时局部孔隙分布不均, 导致气流流动出现微小扰动。

分别计算四种粒径填充床的热效率及焓效率, 如图 13 所示, 图中数据显示, 随着填充球粒径的减小, 热效率和焓效率缓慢提升, 虽然小粒径填充球的比表面积更大, 能够提供更多的换热界面, 但由于小粒径填充球带来的流动阻力更大, 不利于稳定性的提升, 且对热传递的提升作用不大。综合来看, 在本研究选取的粒径范围内, 5 mm 的填充球在储热和释热的温度表现上更为均衡, 既能保证较好的换热效率, 又能维持出口温度的相对稳定。

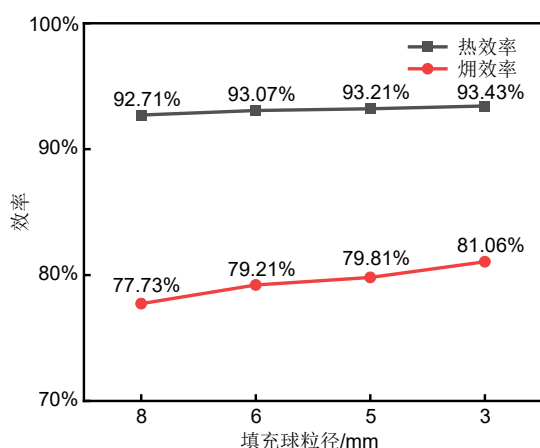


图 13 填充球粒径对效率的影响

Fig. 13 Effect of packing ball size on efficiency

3.4 储/释热时间对储热性能的影响

设计储释热时间 5000~8000 s 范围内的 7 组模拟进行计算, 由图 14 模拟结果可看出, 随着储热时间的延长, 填充床出口温度达到稳定状态的时间增加, 高温阶段随之延长; 而释热时间的延长则使得出口温度在较高水平维持更久, 避免了因释热过快导致的温度骤降。释热阶段的出口温度稳定期存在一个最高值, 从图中可看出在 6250 s 时, 当储/释热时间继续延长, 稳定期温度下降, 出口温度不稳定性增加, 这是由于储热时间过长会导致填充床内部温度分布趋于均匀, 释热阶段初期高温释放速率减缓, 使得稳定期温度提升有限。

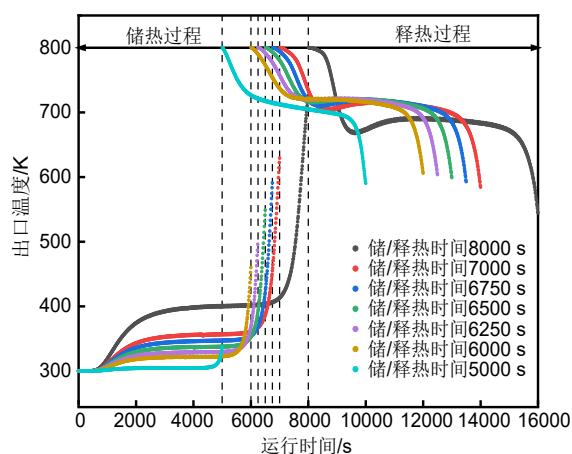


图 14 储/释热时间对出口温度的影响

Fig. 14 Effect of heat storage/release duration on outlet temperature

计算不同储释热时间下填充床的各项性能参数如图 15 所示, 可知热效率随储/释热时间的延长而

提高, 这是因为更长的储/释热过程使得热量交换更充分, 能量损失减少。而烟效率随储释热时间的增加先增加后减少, 在储/释热时间为 6500 s 时达到最大, 适度延长储/释热时间可优化系统的烟利用效率, 但过度延长会因移动速度过慢导致高温气流未到达床层下部就流出, 内部能量品质降低而导致烟效率下降, 储/释热时间的选择需兼顾效率与稳定性的平衡。

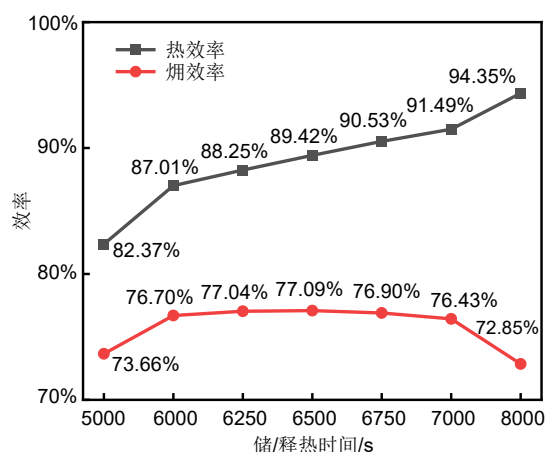


图 15 储/释热时间对效率的影响

Fig. 15 Effect of heat storage/release duration on efficiency

3.5 储-释热循环对储热性能的影响

在大多数工作场景中, 填充床需要进行多次储-释热循环以满足工作要求, 故针对上述模型进行多次储-释热循环的模拟, 过程中出口温度随时间的变化曲线如图 16 所示。

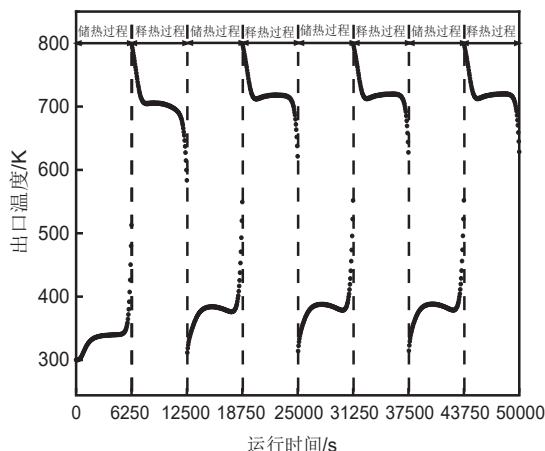


图 16 多次储-释热循环对出口温度的影响

Fig. 16 Effect of multiple heat storage-release cycles on outlet temperature

由图 16 可看出, 第二次循环相比第一次循环, 储热过程出口温度整体升高, 稳定性下降, 且存在一个先上升后下降的过程, 后续循环也遵循这一规律。储热初期, 第一次循环后填充床内部仍残留部分热量, 使得第二次循环的初始温度高于第一次, 随着储热进行, 填充球逐渐吸收热量达到饱和, 出口温度趋于稳定, 而稳定性下降是因为循环过程中床层内温度分布的不均匀性逐渐累积, 局部区域出现热量分布失衡。释热阶段出口温度的变化趋势逐渐趋于稳定, 幅度有所减小, 填充床在经过多次循环后, 内部热量分布逐渐达到一种动态平衡状态, 结构因素对温度变化的影响趋于缓和。

计算多次循环及累计循环下新型储热器储-释热过程的单次热效率、烟效率, 如图 17、图 18 所示。根据图 17 中的数据可看出, 多次储-释热循环中, 单次循环的热效率及烟效率均逐渐升高, 多次循环后达到最高且相对稳定, 这一现象主要是由于前期循环中, 填充床内部残留热量不断累积, 提高了释热阶段的初始温度, 减少了热量损失, 从而提升了能量利用效率。

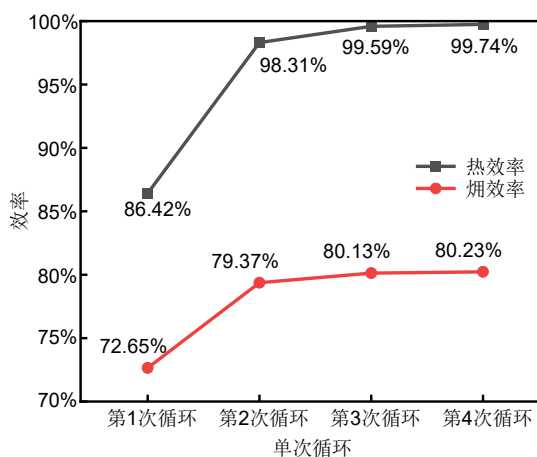


图 17 单次循环对储热器效率的影响

Fig. 17 Effect of single cycle on storage tank efficiency

从图 18 中数据可看出, 随着累计循环次数的增加, 累计热效率和烟效率逐步提升, 系统对能量的综合利用效率不断优化。主要原因在于多次循环后, 填充床内部温度场的动态平衡使得热量损失相对减少, 且残留热量的合理利用进一步提升了整体能效, 循环过程中性能的逐渐稳定也表明该储热器具有较好的运行可靠性和耐久性。

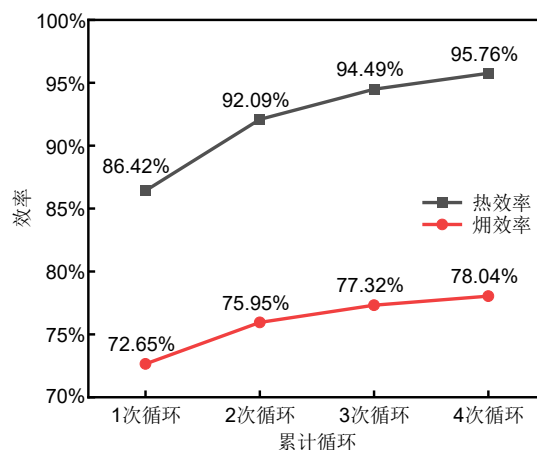


图 18 累计循环次数对储热器效率的影响

Fig. 18 Effect of cumulative cycle count on storage tank efficiency

3.6 进出口移动范围对储热器的性能影响

为探究多次循环中稳定性波动的成因, 设计不同进出口移动范围的模型进行循环运行计算, 改变进出口移动限位的位置, 进而控制不同的移动范围, 其出口温度曲线如图 19 所示, 可知进出口移动范围的大小对填充床释热初期的温度回弹有较大影响, 循环过程中, 进出口移动范围过大时, 由于结构导致床层内局部区域的温度分布失衡会导致出口温度出现突降后回升的现象, 随着进出口移动范围的减小, 这一现象得到较好改善, 考虑到出口温度稳定期的温度水平和稳定性, 进出口移动范围为 93% 时的稳定性最好, 且多次循环也不会导致出口温度出现突降后回升的现象, 整体性能得到较好提升。

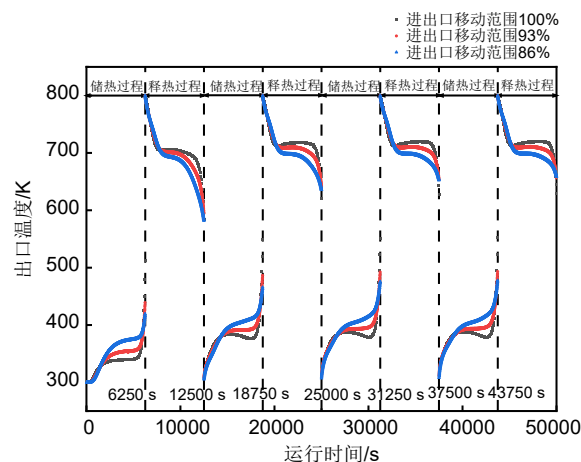


图 19 进出口移动范围对出口温度的影响

Fig. 19 Effect of import and export movement range on export temperature

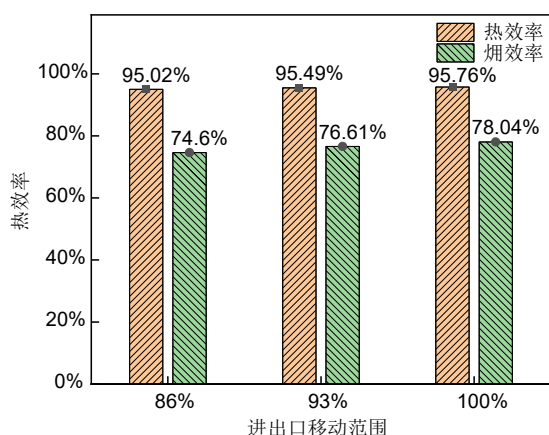


图 20 进出口移动范围对储热器循环运行效率的影响
Fig. 20 Effect of inlet and outlet movement range on the circulation efficiency of the thermal storage tank

计算不同进出口移动范围的填充床的热效率及烟效率,如图20所示,可知随着进出口移动范围的增加,热效率和烟效率逐步升高,但热效率增长不明显,是由于较大的移动范围使得气流在床层内的流动路径更长,与填充球的接触时间和面积增加,换热过程更充分,但由于移动距离变化并不大,故提升并不明显。烟效率有小幅增长,是由于较大的移动范围减少了局部高温区域的热量集中,使得高品质能量能够有效传递。结合出口温度稳定性,进出口移动范围为93%时,既能有效避免温度突降回升现象,又能实现较高的效率,是该储热器在循环运行中的较优参数选择。

4 结 论

本研究提出了一种新型基于移动气流口的储热填充床,通过建立数学模型,分析了其不同进口气流温度、质量流量、填充球粒径、储/释热时间、储-释热循环次数以及进出口移动范围等运行参数下的动态储热特性,得出以下结论:

(1) 基于移动气流口的新型填充床通过构建“移动边界-相对稳定斜温层”新型储热机制,能够在高效率的前提下,使储/释热过程中出口温度波动分别降低至38.61%和28.66%,提高出口气流能量品质及系统运行的稳定性。

(2) 本研究中长宽高比4:1:15、总体积0.06 m³的填充床在质量流量0.007 kg/s、储/释热时间6250 s的运行条件下可满足热效率95.76%的稳定循环运行;减小填充球粒径能提高效率,但不

利于稳定性的提升。

(3) 93%的进出口移动范围能够改善循环运行中的温度“滞后”现象,提升循环运行下的填充床性能,以较高的效率维持填充床长期持续稳定循环运行。

参考文献

- [1] 陈海生,刘畅,徐玉杰,等. 储能在碳达峰碳中和目标下的战略地位和作用[J]. 储能科学与技术, 2021(5): 1477-1485.
CHEN H S, LIU C, XU Y J, et al. The strategic position and role of energy storage under the goal of carbon peak and carbon neutrality[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021(5): 1477-1485.
- [2] 曾光,纪阳,符津铭,等. 热储能技术研究现状、热点趋势与应用进展[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(S1): 127-142.
ZENG G, JI Y, FU J M, et al. Research status, hot trends and application progress of thermal energy storage technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(S1): 127-142.
- [3] PACHECO J E, SHOWALTER S K, KOLB W J. Development of a molten-salt thermocline thermal storage system for parabolic trough plants[C]//ASME 2001 Solar Engineering: International Solar Energy Conference (FORUM 2001: Solar Energy-the Power to Choose), April 21-25, 2001, Washington, DC, USA. 2020: 453-460. DOI:10.1115/SED2001-158.
- [4] 左远志. 熔融盐高温斜温层混合蓄热的热过程特性[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
ZUO Y Z. Thermal process characteristics of mixed heat storage in high temperature inclined temperature layer of molten salt[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [5] 徐佳锐,杨晓宏,张燕楠,等. 单罐复合陶瓷填充床蓄热系统热性能研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(11): 655-662. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1217.
XU J K, YANG X H, ZHANG Y N, et al. Study on thermal performance of single-tank composite ceramic packed bed heat storage system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(11): 655-662. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1217.
- [6] 耿直,苗亿文,李仁凤,等. 单罐熔融盐蓄热装置蓄热特性数值模拟[J]. 热力发电, 2021, 50(5): 108-113.
GENG Z, MIAO Y W, LI R F, et al. Numerical simulation on heat storage characteristics of single tank molten salt heat storage device[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(5): 108-113.
- [7] LAI Z Y, DING L W, LYU H K, et al. Experimental study on energy storage characteristics of sintered ore particle packed beds[J]. Journal of Thermal Science, 2025, 34(1): 242-253. DOI:10.1007/s11630-024-2079-9.
- [8] 朱恂,冯云鹏,李曾敏. 颗粒型固-固相变材料堆积床蓄热与放热实验[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2004(12): 42-44.
ZHU X, FENG Y P, LI Z M. Experimental investigations for thermal storage and rejection of solid-solid phase-change materials in the packing bed[J]. Journal of Chongqing University,

- 2004(12): 42-44.
- [9] 王小惠, 徐超, 杨立军, 等. 导热油砂石填充床单罐斜温层同时蓄放热特性模拟[J]. 化工学报, 2020, 71(S2): 85-91.
- WANG X H, XU C, YANG L J, et al. Simulations on simultaneous charging/discharging process of oil sand packed bed thermocline storage tank[J]. CIESC Journal, 2020, 71(S2): 85-91.
- [10] KOTHARI R, HEMMINGSEN C S, VOIGT N V, et al. Numerical and experimental analysis of instability in high temperature packed-bed rock thermal energy storage systems[J]. Applied Energy, 2024, 358: 122535. DOI: 10.1016/j.apenergy. 2023. 122535.
- [11] 林曦鹏, 陈海生, 王亮, 等. 一种出口温度连续稳定的填充床储能装置: CN111504109B[P]. 2021-06-18.
- [12] LEMMON E W, BELL I H, HUBER M L, et al. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0[DB/OL]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2018. DOI: 10.18434/T4/1502528.
- [13] 杨小平, 杨晓西, 丁静, 等. 高温熔融盐单罐蓄热模型与热性能研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(8): 72-76, 108.
- YANG X P, YANG X X, DING J, et al. Investigation into model and thermal performance of single thermal storage tank with high-temperature molten salt[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(8): 72-76, 108.
- [14] 李国跃, 林曦鹏, 王亮, 等. 储释冷循环对岩石材料性能的影响[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(4): 1074-1081. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0067.
- LI G Y, LIN X P, WANG L, et al. Effects of the charge-discharge cold cycles on performance of the rock materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(4): 1074-1081. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0067.
- [15] 吴玉庭, 任楠, 马重芳. 熔融盐显热蓄热技术的研究与应用进展[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(6): 586-592. DOI:10.3969/j.issn.2095-4239.2013.06.004.
- WU Y T, REN N, MA C F. Research and application of molten salts for sensible heat storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(6): 586-592. DOI: 10.3969/j. issn. 2095-4239.2013.06.004.
- [16] MEIER A, WINKLER C, WUILLEMIN D. Experiment for modelling high temperature rock bed storage[J]. Solar Energy Materials, 1991, 24(1/2/3/4): 255-264. DOI:10.1016/0165-1633(91)90066-T.