储能XXXX

面向工业用热的大容量水合盐相变储热床高功率储释特性实验研究

魏思雨[1]，文绍牧[2]，张锦涛[1]，林　冬[1]，胡金燕[1]，赵　靓[1]，王　炯[3]，陈天欣[1]，岳添漆[1]，孙　月[1]

（[1]中国石油西南油气田公司安全环保与技术监督研究院，四川 成都 610041；[2]中国石油西南油气田公司，四川 成都 610056；[3]中国石油西南油气田公司川中油气矿，四川 遂宁 629000）

摘　要：水合盐相变储热技术具有储热密度高、成本低等优势，在工业用热领域具有广阔应用前景。本文选用八水合氢氧化钡作为储热材料，基于管壳式换热结构设计并搭建了一套大容量水合盐相变储热床实验系统。通过实验研究系统的运行特性，探究了加热功率对储热过程的影响，以及进口温度、进口流量和间歇放热模式对放热性能的影响规律。实验结果表明：储热过程中床层温度呈现固体显热升温、恒温相变储热和液体显热升温三个阶段，相变温度平台稳定在78℃左右；额定加热功率由10 kW提升至20 kW时，储热功率由9.8 kW增至19.0 kW，储热时间显著缩短。放热过程中，降低进口温度可大幅提升放热功率，当进口温度由60℃降至30℃时，放热功率由20 kW提高至70 kW，表明换热温差是放热能力的主导因素；增大流量虽能提高对流换热系数，但对放热功率的提升效果有限；间歇放热实验发现，停止通流后床层温度可回升至相变点附近，反映出水合盐存在显著的过冷现象及内部热阻，导致凝固速率远低于熔化速率。本研究揭示了水合盐相变储热床在大容量、高功率工况下的储放热特性及过冷影响机制，为面向工业用热的相变储热技术应用提供了实验依据和理论支撑。

关键词：八水合氢氧化钡；相变储热；管壳式储热床；高功率储放热；过冷

doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0563

中图分类号：TK 02　　文献标志码：A　　文章编号：2095-4239（XXXX）XX-1-12

Experimental study on high-power charging and discharging characteristics of a large-capacity hydrated salt phase change thermal storage bed for industrial heating

Wei Siyu[1], Wen Shaomu[2], Lin Dong[1], Hu Jinyan[1], Zhao Liang[1], Wang Jiong[1], Chen Tianxin[3], Yue Tianqi[1], Sun Yue[1]

([1]Safety, Environmental Protection and Technical Supervision Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; [2]PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610056, Sichuan, China; [3]Chuanzhong Oil and Gas Mine, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Suining 629000, Sichuan, China)

Abstract: Hydrated salt phase change thermal storage technology offers advantages such as high thermal storage density and low cost, demonstrating broad application prospects in the industrial heating sector. In this study, barium hydroxide octahydrate was selected as the

收稿日期：2026-06-30；修改稿日期：2026-08-06。
基金项目：中国石油天然气股份有限公司西南油气田公司科研项目（2024D112-06）。
第一作者：魏思雨（1993—），女，博士，研究方向储热技术，E-mail：weisiyu@petrochina.com.cn；通信作者：赵靓，高级工程师，研究方向，节能环保，E-mail：zhaoliang03@petrochina.com.cn。
引用本文：魏思雨, 文绍牧, 张锦涛, 等. 面向工业用热的大容量水合盐相变储热床高功率储释特性实验研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-12.
Citation：Wei Siyu, Wen Shaomu, Lin Dong, et al. Experimental study on high-power charging and discharging characteristics of a large-capacity hydrated salt phase change thermal storage bed for industrial heating[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-12.

thermal storage material, and a large-capacity shell-and-tube thermal storage bed experimental system was designed and constructed. Through experimental investigation of the system's operational characteristics, the effects of heating power on the charging process, as well as the effects of inlet temperature, inlet flow rate, and intermittent discharging mode on the discharging performance, were explored. The experimental results indicate that during the charging process, the bed temperature exhibits three distinct stages: solid sensible heat rise, constant-temperature phase change thermal storage, and liquid sensible heat rise, with the phase change temperature plateau stable at approximately 78° C. When the rated heating power increases from 10 kW to 20 kW, the thermal storage power rises from 9.8 kW to 19.0 kW, significantly shortening the charging time. During the discharging process, reducing the inlet temperature substantially enhances the heat release power; as the inlet temperature decreases from 60° C to 30° C, the heat release power increases from 20 kW to 70 kW, indicating that the heat transfer temperature difference is the dominant factor. Increasing the flow rate improves the convective heat transfer coefficient but has a limited effect on the heat release power. Intermittent discharge experiments reveal that after the flow is stopped, the bed temperature rebounds to near the phase change point, reflecting significant supercooling and internal thermal resistance of the hydrated salt, which results in a solidification rate much lower than the melting rate. This study elucidates the charge/discharge characteristics and supercooling mechanism of a large-capacity, high-power hydrated salt phase change thermal storage bed, providing experimental data and theoretical support for the application of phase change thermal storage technology in industrial heating.

Keywords: Barium hydroxide octahydrate; Phase change thermal storage; Shell-and-tube thermal storage bed; High-power charge/discharge; Supercooling

1 引 言

在全球碳达峰、碳中和战略目标驱动下，能源系统正加速向清洁低碳、安全高效的方向转型[1]。工业领域作为我国能源消费的主体，其热能需求广泛覆盖加热、干燥、反应合成及设备运维等关键环节，传统以燃煤/燃气锅炉为主的供热方式带来显著的碳排放与污染物排放[2] [3]。推动工业用热清洁替代已成为实现能源系统深度脱碳的关键路径之一。储能技术作为连接波动性可再生能源（如光伏、风电、余热）与刚性工业热负荷的核心枢纽，可有效弥合能源供给侧与消费侧的不匹配性[4] 。其中，储热技术是指将热能以显热、潜热或热化学等形式储存，并在需要时释放的技术[5] ，可将低价谷电、弃风弃光电或工业余热以热能形式存储，并在用热高峰时段以高功率形式稳定释放，既实现新能源消纳及电网削峰填谷，又可保障工业生产的连续性，是工业脱碳的重要路径之一[6][7]。

潜热储热又称相变储热，是利用相变材料在发生相变时吸收/放出热量来进行热能储存/释放[8]。相变储热材料分为有机相变储热材料，如石蜡[9]、聚乙二醇[10]等，无机相变储热材料，如三水合乙酸钠[11]、七水合硫酸镁[12]、六水合氯化钙[13]等。其中，石蜡的相变温度通常在20~70℃范围内，聚乙二醇的相变温度在50℃左右；三水合乙酸钠的相变温度约为58℃，七水合硫酸镁的相变温度约为48℃，六水合氯化钙的相变温度约为29℃[9-13]。相较于有机相变材料，水合盐相变材料具有高能量密度、导热系数高、材料成本低的优势[14]。相变储热床是储热系统的核心，其结构分为管壳式[15] [16]、板式[17]、填充床式[18] [19]等。其中板式及填充床式换热器均需要将相变储热材料进行封装，包括板形封装、圆柱形封装、圆球形封装等。研究者对储热材料在储热床中的性能开展了大量的研究工作。农欣露等以三水合乙酸为储热材料，研究了其在螺旋盘管式相变储热器的放热性能，发现了液相显热降温、再辉诱

发的潜热释放和固相显热冷却三个阶段的动力学特征。当材料的热导率提升至1.2 W/(m·K)时，再辉阶段的出口温度和释热功率峰值分别提升了17.8%和35.7%[20]。刘云汉等以三水合乙酸钠为相变材料、通过圆柱形相变单元封装，开展了储热装置的储放热特性研究。结果表明，提高储热温度和增大流量可缩短储热用时、提升热效率和储热密度，储热装置的热效率可达94.73%，储能密度可达71.77 kW·h/m^3[21]。鲁博辉研发了多通道带螺旋形翅片的石蜡相变储热装置，通过调节工质流量与换热流体温度可以显著缩短完全储热时间，当流量从0.5 L/min增加至2.0 L/min时，储热时间缩短了47.49%[22]。段建国等则设计了一种模块化矩形腔体内插U型管相变储能散热器，以石蜡为储能介质，泡沫铜为填充材料，研究显示泡沫铜显著增强了石蜡的导热性能。换热工质流速从1.0 L/s提高至2.0 L/s时，相变储能散热器的储热时间缩短50%以上[23]。

由上述文献可知，目前研究涉及的相变储热材料（如三水合乙酸钠58℃、七水合硫酸镁48℃、六水合氯化钙29℃、石蜡20~70℃等）的相变温度大多集中在70℃及以下，其应用场景多为建筑供暖领域。而面向工业用热需求的大容量、高功率相变储热装置的储/释热特性研究仍相对匮乏。为此，本文选用八水合氢氧化钡作为储热材料，其相变温度可达78℃，且具有较高的储热密度，在工业用热领域展现出良好的应用潜力[24]。基于管壳式换热结构，搭建了一套大容量水合盐相变储热床实验测试系统（理论储热量648 MJ）。通过储热性能实验，研究了床层内部的温度演化规律及储热功率的关键影响因素；进一步开展放热性能测试，探讨了进口温度与进口流量对填充床出口温度及放热功率的影响机制。此外，设计间歇放热实验，揭示储热材料相态变化与床层放热性能之间的内在关联。上述研究旨在为面向工业用热的相变材料在大容量储热设备中的应用提供理论依据与实验数据，并为后续设计更高效的储热与释热系统奠定基础。

2 储放热特性实验研究

2.1 实验装置

本实验搭建的储热床储放热特性实验系统如图1(a)所示，所设计的水合盐相变储热床结构如图1(b)所示，采用管壳式结构，其中管程为循环流体通道，壳程内填充无机相变储热材料。储热床整体尺寸为860 mm×1560 mm×1100 mm，设有一个主进水口和一个出水口。储热材料相变温度为78℃，该储热床的理论储热量为648 MJ，储热材料的物性参数如表1所示。

表1 无机相变储热材料的物性参数

Table 1 Physical Property Parameters of Inorganic Phase Change Thermal Energy Storage Materials

参数	数值
相变温度（℃）	78
潜热（J/g）	380
固体比热容（J/g·℃）	1.90
液体比热容（J/g·℃）	2.76
导热系数（W/m K）	1.072
骨架密度（g/cm^3）	2.27
堆积密度（g/cm^3）	1.05

2.2 实验系统

储/放热特性实验系统主要由储热床、电加热器、水箱、潜水泵、数据采集系统、水源、排水及控制系统等组成。加热系统由两台额定功率为10 kW的管道电加热器构成；系统循环动力由循环水泵提供，水箱用作循环流体的中转储液装置。实验数据通过一套完整的数据采集系统实时获取与记录。

为分析床层内部储热材料的温度分布，沿装置轴向设置三个测温截面（切面1、切面2、切面3），每个截面布置5个温度传感器，共计15个测温点。各测温点均采用PT100热电阻，精度为±0.15℃，具体测点分布如图2所示。此外，在储热床的进口与出口处分别安装温度传感器，用于监测循环液体的进出口温度；循环管路上设置超声波流量计，型号JBC-FC，精度1.5%，用于测量储热床的进口流量。

在储/放热过程中，瞬时放热功率q(t)由数据采集系统实时记录的进出口温度和流量计算得到，如下式所示：

$$q(t) = \rho \cdot V \cdot \left| Cp_{out} \cdot T_{out} - Cp_{in} \cdot T_{in} \right| / 3600$$

其中ρ为水的密度（kg/m^3），V为体积流量（m^3/h），Cp为水的比热容（J/(kg·K)），T_{out}和T_{in}分别为储热床出口和进口水温（℃）。

平均放热功率q_{avg}为某一工况下放热过程中的

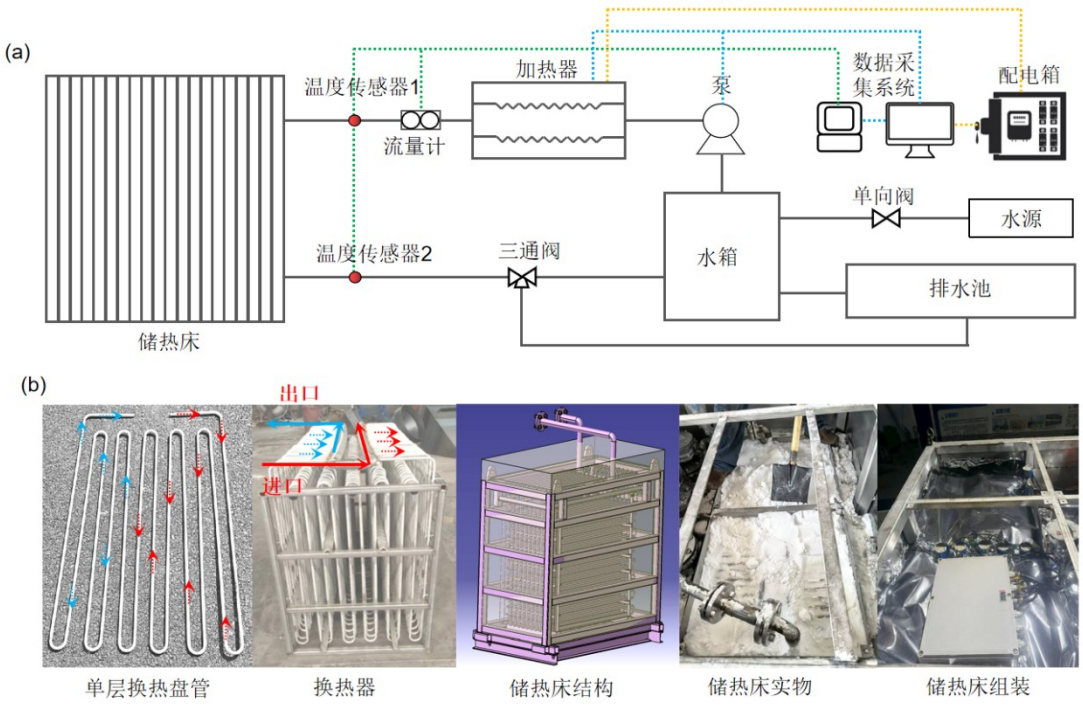


图1 储热床储放特性实验系统示意图 (a)；换热盘管、换热器实物图、储热床结构示意图及实物图 (b)

Fig. 1 Schematic diagram of the thermal storage bed charge-discharge characteristic experimental system (a); physical images of the heat exchange coil and heat exchanger, schematic diagram and physical images of the thermal storage bed (b)

时间平均功率，如下式所示：

$$q_{avg} = \frac{1}{\tau}\int q(t)\mathrm{d}t$$

其中τ为该工况的持续储放热时间。

2.3 实验步骤

2.3.1 储热实验

准备工作：打开阀门2向水箱注水，水箱液位到达0.7 m时停止注水，三通阀调至水箱侧。启动循环泵，使水经加热器、流量计、温度传感器1、储热床、温度传感器2及阀门1回流至水箱，形成储热内循环。待储热床15个测温点温度均低于75℃且流量稳定后，准备实验。

正式实验：启动电加热器，循环水经加热升温后进入储热床与储热材料换热，热量被储存，降温后的水经出口回流至水箱。随加热进行，水箱水温逐渐升高，当储热床15个测温点均达到80℃以上时，储热过程完成，关闭循环泵及加热器。

实验工况：分别开展电加热器额定功率为10 kW和20 kW的储热实验各一次。

2.3.2 放热实验

准备工作：储热结束后，将三通阀转向排水池，启动循环泵将系统内高温水排空，待水箱液位由0.7 m降至0.3 m时关闭泵。随后打开单向阀向水箱注水至液位0.7 m，三通阀调回水箱侧，启动循环泵进行放热内循环，通过重复排水与注水操作调节入口水温至目标值，并通过调节泵频率控制循环流量。

正式实验：待进口温度与流量稳定后，将三通阀转向排水池。启动水泵，冷水流经停用的加热器后进入储热床吸收热量，升温后经出口排入水池。当水箱液位由0.7 m降至0.3 m时，单次放热实验结束。重复注水、内循环及参数调节，进行下一次放热实验，共需6~8次单次实验完成全部潜热释放。

实验工况：开展恒定流量（2.54 m^3/h）下不同入口温度（34℃、40℃、52℃、60℃）的单次放热实验，以及恒定入口温度（32~37℃）下不同流量（1.7 m^3/h、2.1 m^3/h、2.56 m^3/h、3.3 m^3/h）的单次放热实验。

2.3.3 间歇放热实验

准备工作：储热结束后，将三通阀转向排水池，启动循环泵将系统内高温水排空，待水箱液位

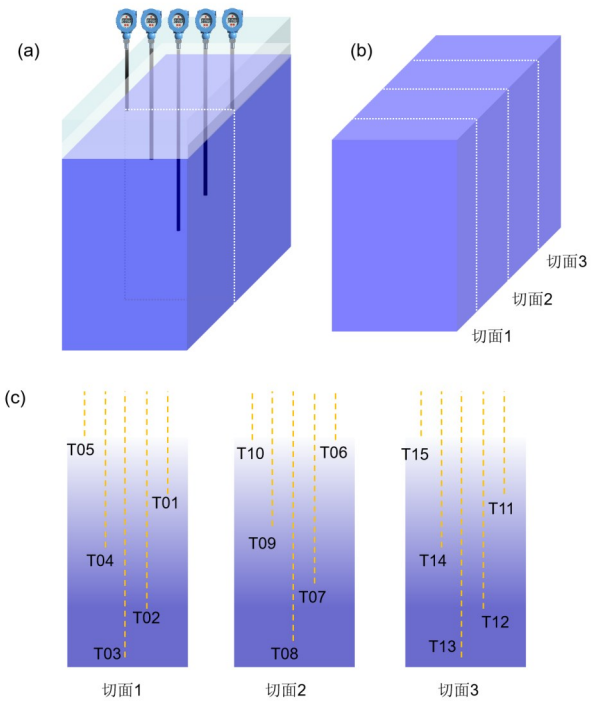


图2　储热床温度传感器安装示意图 (a)；储热床温度传感器安装的三个切面示意图 (b)；三个切面的温度传感器检测位置示意图 (c)

Fig.2　Schematic diagram of heat storage bed temperature sensor installation (a); Schematic diagrams of three cross-sections for heat storage bed temperature sensor installation (b); Schematic diagrams of temperature sensor detection positions in the three cross-sections (c)

由0.7 m降至0.3 m时关闭泵。随后打开单向阀向水箱注水至液位0.7 m。

正式实验：将三通阀转向排水池，启动水泵，冷水流经停用的加热器后进入储热床吸收热量，升温后经出口排入水池。当水箱液位由0.7 m降至0.3 m时，关闭水泵。打开水源再次注水至液位恢复0.7m，启动水泵，冷水流经停用的加热器后进入储热床吸收热量，升温后经出口排入水池。如此往复，直至储热床温度降低在70℃以内。

实验工况：放热过程大约3min，停止放热过程大约40~120min不等，随后再次放热。控制每次入口流量为2.54 m^3/h，入口温度不做控制。

2.4　不确定度分析

实验误差分为直接误差和间接误差，直接误差可由测量仪器的精度和测量值计算，间接误差通过误差传递理论进行评估，计算公式为[25]：

$$\delta R=\left[\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\partial R}{\partial X_i}\delta X_i\right)^2\right]^{1/2}$$

利用上式对本实验主要测量参数的误差进行分析，其中储热温度、循环介质流量、储热功率、放热功率的最大相对误差分别为0.5%、1.5%、14.8%、3.96%。

3　结果与讨论

3.1　储热特性

图3展示了在额定加热功率10 kW下的储热过程特性。其中，图3(a)为储热床温度随时间的变化曲线，表明储热过程可划分为三个阶段：（1）固体显热升温阶段：储热材料温度呈近似线性上升；（2）相变储热阶段：当材料温度达到相变点时发生熔融，此时持续吸热但温度基本保持稳定在78℃；（3）液体显热升温阶段：材料完全熔化后，温度再次随加热线性上升。图3(b)展示了储热器的进口水温与出口水温的变化。在电加热持续作用下，进水温度逐渐升高至81.7℃，此时储热床的温度达到了储热材料的相变温度。在恒温相变储热阶段（523~902min），储热床进、出口水温及储热床温度共同形成一个明显的温度平台，进出口水温温差为1.43℃，进水口与储热床层的温差为2.2℃，此时储热功率稳定维持在约9.8 kW。

图4展示了在额定加热功率20 kW、进口流量约为5.31 m^3/h条件下的储热过程特性。图4(a)为储热床温度曲线，可以看出储热过程同样呈现三个阶段，不同之处在于固体显热升温阶段的时间显著缩短，约150 min后即达到相变点。在相变储热阶段，不同位置的储热材料温度分布不均匀，随着电加热功率增大，储热功率相应提高，反映出材料内部存在明显的传热受阻现象。约450 min后相变过程结束，进入液体显热升温阶段，床层温度随进口水温继续上升至85℃并趋于稳定。与10 kW加热工况相比，加热功率的提升明显缩短了储热所需时间。图4(b)展示了储热器的进口水温与出口水温的变化。在恒温相变储热阶段（220~470 min），进口水温稳定在85.2℃，进出口水温差为3.1℃，此时进口水温与床层温度的差值超过5℃。该阶段的平均储热功率约为19 kW。

表2对比了两个典型工况下的流动及换热参数。循环流体的雷诺数Re均高于4000，说明换热

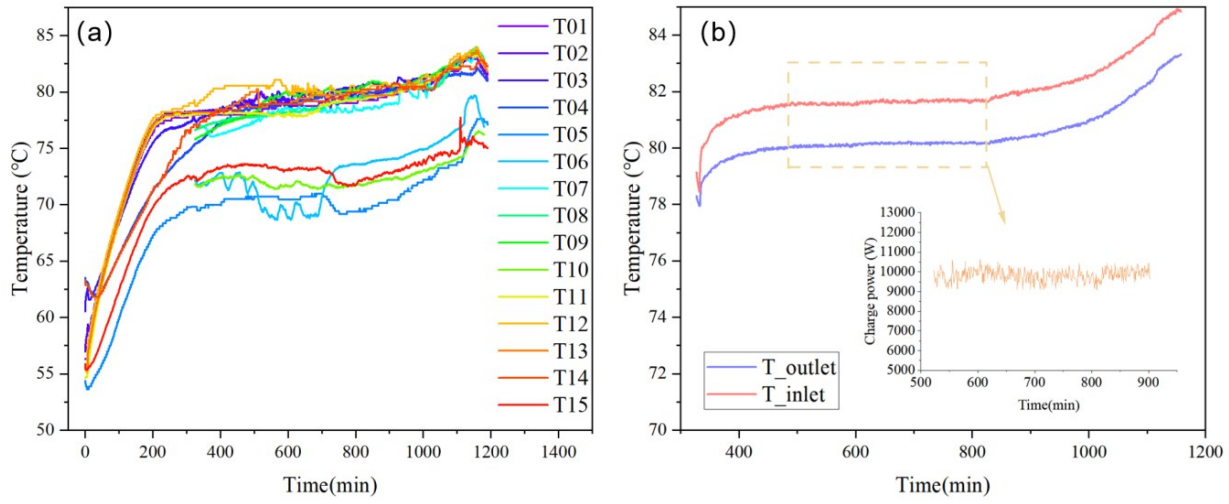


图3 储热过程（额定加热功率10 kW）：床层温度 (a)；储热床进出口温度及储热功率 (b)

Fig.3 Thermal storage process (rated heating power of 10 kW): bed temperature (a); Inlet and outlet temperatures and thermal storage power of the thermal storage bed (b)

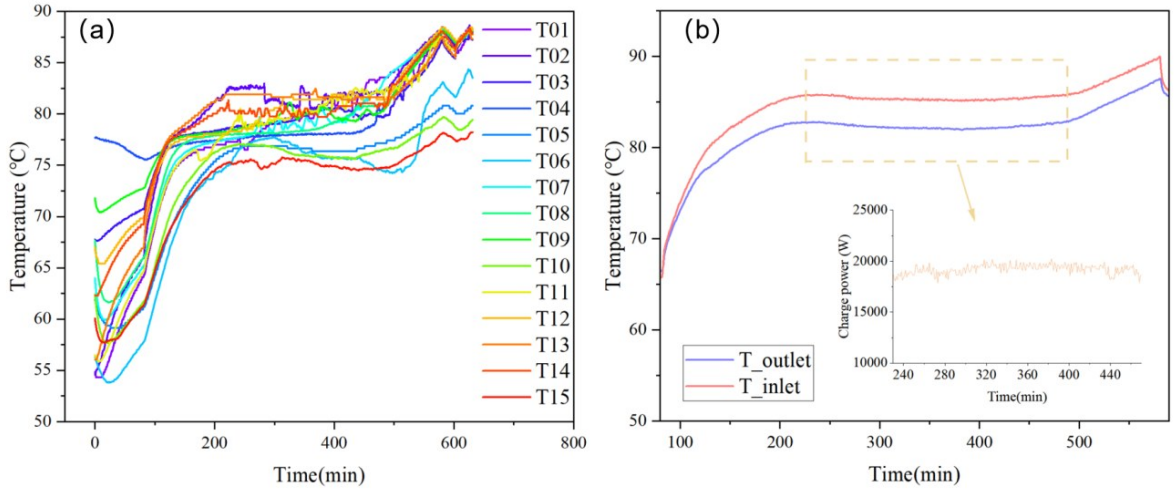


图4 储热过程（额定加热功率20 kW）：床层温度 (a)；储热床进出口温度及储热功率 (b)

Fig.4 Thermal storage process (rated heating power of 20 kW): bed temperature (a); Inlet and outlet temperatures and thermal storage power of the thermal storage bed (b)

过程为湍流换热。基于Dittus-Boelter关联式计算出两个工况的对流换热系数分别为7562 W/(m²·K)和7345 W/(m²·K)，均处于较高水平。根据牛顿冷却定律，在换热面积A与换热系数h相对稳定的条件下，储热功率Q主要取决于换热温差，即 T_{inlet}-T_{bed}。实验中，更高的电加热功率直接导致了更高的入口水温（T_{inlet}），从而增大了换热温差，说明了储热功率主要由热源即电加热功率控制。

表2 不同工况下储热过程的流动及换热参数

Table 2 Flow and heat transfer parameters of heat storage process under different operating conditions

工况	总流量 m^3/h	流速 m/s	水温 ℃	Re	换热系数 W/(m²·K)	换热温差 ℃	平均储热功率 kW
额定加热功率10kW	5.68	1.046	81.7	22914	7562	2.2	9.8
额定加热功率20kW	5.31	0.978	85.3	22556	7345	>5	19.0

3.2 放热特性

3.2.1 不同进口温度

图5为储热床在放热过程中，进口温度变化对其放热性能的影响规律。图5(a)表明，在进口流量恒定为约2.56 m^3/h的条件下，随着换热流体进口温度的升高，经过储热床与换热流体的热交换后，流体出口温度进一步升高。图5(b)进一步揭示了进口温度对放热功率的显著影响。当储热床温度维持在70~75℃范围内时，降低进口温度能大幅提升放热功率。进口温度为30℃时，放热功率可达70 kW；而当进口温度升至60℃时，放热功率则下降至20 kW。这一现象与前文换热系数随进口温度升高而略有增加的趋势看似矛盾，实则点明了影响放热功率的主导因素。

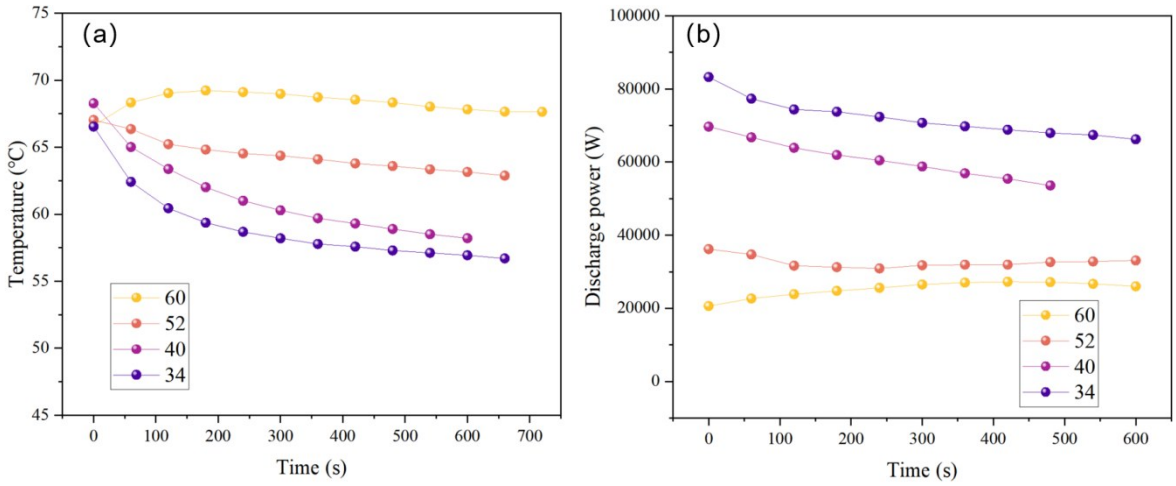


图5 放热过程不同进口温度对出口温度 (a) 及放热功率 (b) 的影响（进口流量2.56 m^3/h）

Fig.5 The influence of different inlet temperatures on outlet temperature (a) and heat release power (b) during the heat release process (inlet flow rate 2.56 m^3/h)

表3展示了放热过程不同入口温度下的流动及换热参数。上述规律可通过牛顿冷却定律（$q=h\cdot A\cdot \Delta T$）得到合理解释。在放热过程中，驱动力温差$\Delta T=T_{bed}-T_{inlet}$。虽然提高进口温度会使换热系数h微增，但其对$q$的正向贡献远不及由此导致的$\Delta T$急剧减小所带来的负面影响。因此，放热功率主要由进口与储热床之间的温差驱动，降低进口温度是提升瞬时放热能力的有效手段。

3.2.2 不同进口流量

在固定进口温度约31℃、储热床温度维持在70~75℃的条件下，研究进口流量变化对放热性能的影响。图6(a)显示，随着进口流量降低，出口温度显著升高。这主要是因为在相同热源（储热床）和进口温度下，较低的流量使得流体在床层内获得更长的加热时间，从而被加热到更高的温度。图6(b)进一步分析了流量对放热功率的影响。结果表明，尽管流量在较大范围内变化，但测得的放热功率差异不大。这一现象需要结合换热机理进行解释。图6及表4中的数据表明，换热系数随流量的增加而显著增大，其原因在于雷诺数Re升高，进而加剧了湍流扰动。

表3 放热过程不同入口温度下的流动及换热参数

Table 3 Flow and heat transfer parameters under different inlet temperatures during the exothermic process

工况	总流量 m^3/h	流速 m/s	水温 ℃	Re	换热系数 $W/(m^2\cdot K)$
1	2.54	0.468	34	4875	3057
2	2.54	0.468	40	5661	3295
3	2.54	0.468	52	6958	3602
4	2.54	0.468	60	7850	3826

根据牛顿冷却定律（$Q=h\cdot A\cdot \Delta T$），放热功率由换热系数h、换热面积A和温差ΔT共同决定。在固定进口温度条件下，驱动温差$\Delta T=T_{bed}-T_{inlet}$基本恒定。尽管流量从1.7 m^3/h增至3.3 m^3/h使对流换热系数h从2182 $W/(m^2\cdot K)$增至3760 $W/(m^2\cdot K)$，但由于ΔT恒定，q的提升被约束在约22%（从18 kW至22 kW）。这说明在大容量储热床中，调节流量对放热功率的调控效果较弱。同时，出口温度随流

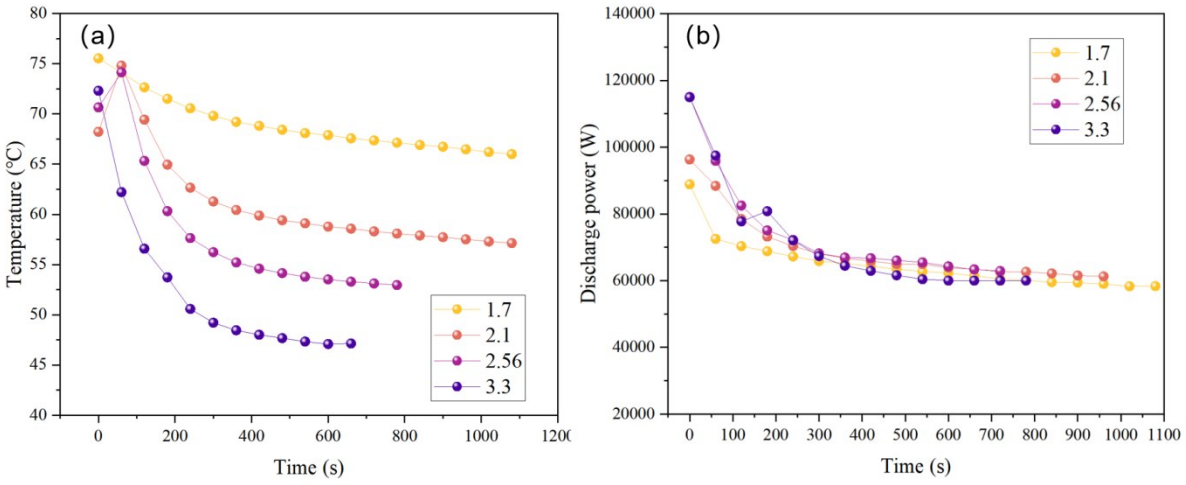


图6 放热过程中不同进口流量对出口温度 (a) 及放热功率 (b) 的影响

Fig.6 The influence of different inlet flow rates on outlet temperature (a) and heat release power (b) during the heat release process

量增大而降低：流量1.7 m³/h时出口温度约55℃，流量3.3 m³/h时出口温度约38℃，降幅约17℃。这是因为低流量下流体在床层内的停留时间更长，换热更充分，出口温度更高。综合来看，在本系统参数下，流量变化对换热系数的影响显著，但对放热功率的影响有限，调整进口温度是更为有效的放热功率调控手段。

表4 放热过程不同入口流量下的流动及换热参数

Table 4 Flow and heat transfer parameters under different inlet flow rates during the exothermic process

工况	总流量 m^3/h	流速 m/s	水温 ℃	Re	换热系数 $W/(m^2·K)$
1	1.7	0.31	36.3	3510	2182
2	2.1	0.39	32	4030	2626
3	2.56	0.47	32	4875	3057
4	3.3	0.61	32	6314	3760

3.2.3 间歇放热

控制入口温度的恒定，改变进口流量，观察储热床出口温度的变化情况。图7(a)为放热过程不同流量下的出口温度、进出口温差以及床层温度变化曲线。理论上，相变凝固应在恒温下进行，在进口温度接近恒定的情况下，出口温度恒定。然而数据表明储热床温度在放热期间持续下降，导致进出口温差降低。这导致实际驱动温差ΔT（T_{bed}-T_{inlet}）偏低，进而造成实测换热功率低于预期。为探究该现象机理，我们开展了间歇放热实验，在向储热床通入冷水进行放热一段时间后，停止放热并维持一段时间，结果表明停止流体换热后，床层温度出现明显回升至相变点附近，如图7(b)所示。在间歇放热实验中，放热过程持续约3 min后停止，停止放热过程40~120 min不等。以首次间歇放热为例，放热阶段床层温度从78℃降至69℃，停止通流后约60 min内床层温度回升至76℃，回升幅度达7℃。多次间歇放热后，总放热功率呈现逐渐降低的趋势：首次放热功率约70 kW，末次放热功率仅为20 kW。这表明水合盐相变储热材料的潜热释放不完全，凝固速率远低于熔化速率。从成核理论角度分析，水合盐分子间强氢键作用导致临界成核势垒较高，材料需在显著低于理论相变温度时才能触发凝固，造成放热滞后和潜热释放不充分。

图8展示了相变储热材料在储热过程和放热过程中相变的具体步骤。储热（熔化）过程：当入口水温（>76℃）高于材料相变温度时，热量由流体传入材料。材料由外向内逐层、均匀熔化，相变界面推进平缓，床层温度得以稳定维持在76℃左右。放热（凝固）过程：当入口水温低于相变温度时，热量由材料传向流体。靠近换热壁面的液体材料迅速过冷并凝固，形成固体层；而内部材料仍保持液态。在放热（凝固）过程中，固相层的导热热阻为：

$$R_s = \frac{\delta}{\lambda}$$

其中δ为固相层厚度（m），λ为八水合氢氧化

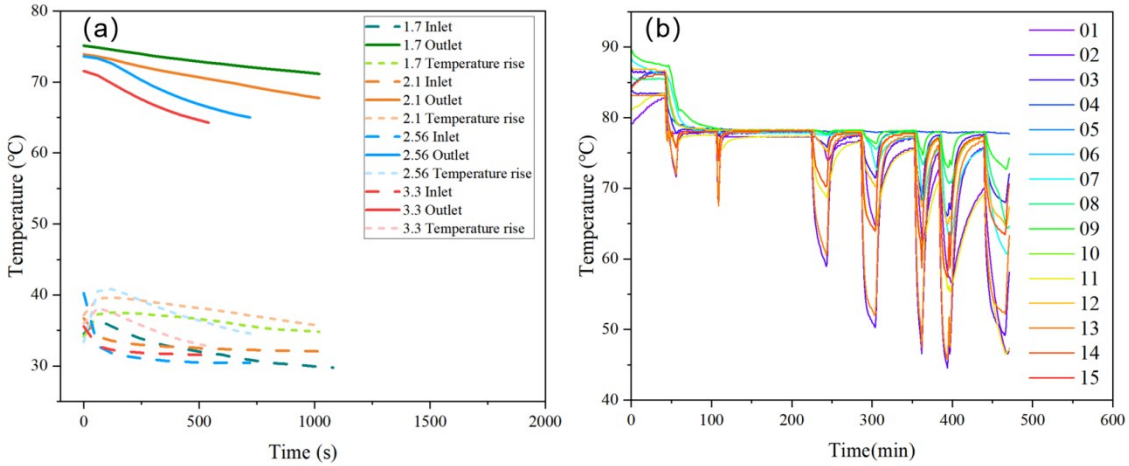


图7　放热过程不同工况的出口温度、进出口温差 (a)；放热过程床层温度 (b)

Fig.7　The outlet temperature and temperature difference between inlet and outlet under different operating conditions during the heat release process (a); Bed temperature during exothermic process (b)

钡的导热系数（W/(m·K)）。

管内对流换热热阻约为：

$$R_c = \frac{1}{h}$$

其中，h为对流换热系数（W/(m²·K)）。

经计算，固相层导热热阻是对流换热热阻的28倍，说明了凝固传热过程中固相导热为主导热阻，而非对流换热，宏观上表现为床层温度下降和放热功率受限。相比之下，熔化过程中材料由外向内均匀逐层熔化，不形成高阻隔层，因此熔化速率远高于凝固速率。

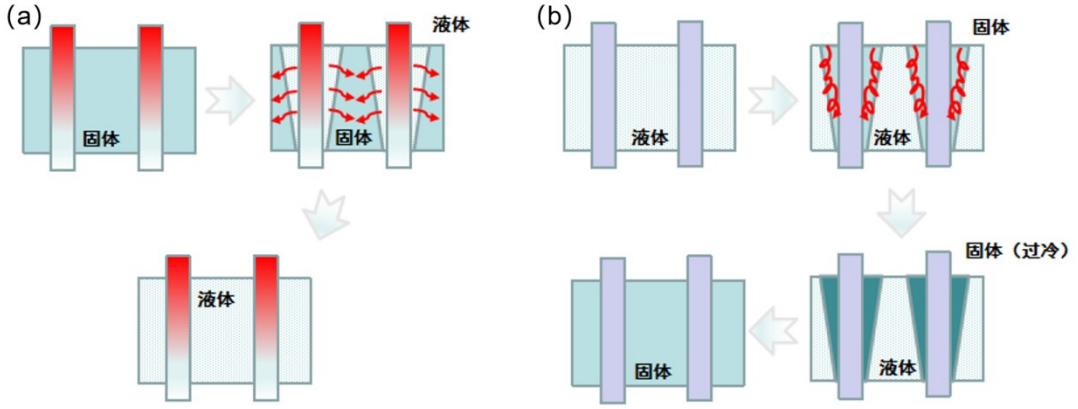


图8　储热阶段相变材料融化过程示意图（a）；放热阶段相变材料凝固过程示意图（b）

Fig.8　Schematic diagram of the melting process of phase change materials during the thermal storage stage (a); Schematic diagram of solidification process of phase change material during exothermic stage (b)

水合盐相变储热材料在放热过程中普遍存在的过冷现象，是其工程应用中最突出的技术瓶颈[26]。水合盐分子间强氢键作用赋予了材料高相变焓与储热密度[27]，但同时也导致凝固结晶过程中临界成核所需的吉布斯自由能显著升高、临界成核半径增大，且晶体生长速率缓慢，使得材料必须在显著低于理论相变温度时才能触发凝固，造成放热滞后和潜热释放不充分[28]。在实际应用中，过冷现象表现为设备需提高回水温度、降低热负荷才能维持正常供热，这直接制约了储热功率的稳定输出。为抑制过冷，通过添加成核剂可有效降低固液界面能，减小成核势垒，促进异相成核，从而将过冷度控制在较低水平，保障水合盐储热材料的高效、稳定放热。

4 结 论

（1）储热过程中，床层温度变化呈现明显的三个阶段：固体显热升温、恒温相变储热和液体显热升温。在额定加热功率为10 kW和20 kW下，相变温度平台均稳定在78℃左右，储热功率分别约为9.8 kW和19 kW。提高加热功率可显著缩短储热时间，但相变材料内部存在传热受阻现象，导致床层温度分布不均匀。储热功率主要由热源温度与床层之间的换热温差控制。

（2）放热过程中，降低进口温度可显著提升放热功率，当进口温度由60℃降至30℃时，放热功率由20 kW提高至70 kW，表明换热温差是放热能力的主导因素。增大流量（1.7~3.3 m^3/h）虽能提高对流换热系数，但对放热功率的提升效果有限，存在明显的调控瓶颈。间歇放热实验表明，停止通流后床层温度可回升至相变点附近，反映出材料存在显著的过冷现象和内部热阻。

（3）水合盐相变储热材料在放热（凝固）过程中易出现过冷，导致床层温度持续下降、实际换热功率低于预期，且凝固速率远低于熔化速率。相变材料在熔化时呈均匀逐层推进，而在凝固时靠近壁面迅速形成固体层，阻碍内部潜热释放，造成放热滞后和潜热利用不充分。为改善系统输出特性，需通过添加成核剂等方式抑制过冷，以保障稳定高效的放热性能。

参 考 文 献

[1] 巨星, 徐超, 郝俊红, 等. 新型储能技术进展与挑战Ⅱ:物理储能与储热技术[J]. 太阳能, 2024, (8): 48-58. DOI: 10.19911/j. 1003-0417. tyn20240610.03.
JU X, XU C, HAO J H, et al. Progress and challenges in novel energy storage technologies Ⅱ: Physical energy storage and thermal storage technology[J]. Solar Energy, 2024(8): 48-58. DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20240610.03.

[2] 张雅娟, 彭猛, 黄晓丹, 等. 我国工业用热电气化面临的挑战及对策建议[J]. 可持续发展经济导刊, 2025, (4): 26-30. ZHANG Y J, PENG M, HUANG X D, et al. Challenges and policy recommendations for electrification of industrial heat and power in China[J]. Sustainable Development Economy Guide, 2025(4): 26-30.

[3] 袁建丽, 赵建平. 新能源电热转化清洁低碳蒸汽系统技术研究[J]. 工业锅炉, 2025(6): 18-23. DOI: 10.16558/j. cnki. issn1004-8774. 2025.06.003.
YUAN J L, ZHAO J P. Research on the technology of new energy electricity-to-heat conversion for clean and low-carbon steam system[J]. Industrial Boiler, 2025(6): 18-23. DOI: 10.16558/j.cnki. issn1004-8774.2025.06.003.

[4] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2024年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2149-2192. DOI: 10.19799/j. cnki. 2095-4239.2025.0553.
CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress on China's energy storage technology in 2024[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(6): 2149-2192. DOI: 10.19799/j. cnki.2095-4239.2025.0553.

[5] 苏畅, 席奂. 面向波动热源的储热式换热器的动态特性实验研究[J]. 河北工业大学学报, 2025, 54(3): 1-7. DOI: 10.14081/j. cnki. hgdxb.2025.03.001.
SU C, XI H. Experimental study on dynamic characteristics of thermal energy storage heat exchangers under the fluctuating heat sources[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2025, 54(3): 1-7. DOI: 10.14081/j.cnki.hgdxb.2025.03.001.

[6] 张玉杰, 陈讲运, 李建强, 等.«中国蓄热储能产业发展报告(2024)»——产业技术、发展现状与典型示范[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(12): 4452-4463. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0834.
ZHANG Y J, CHEN J Y, LI Ji Q, et al. "China Thermal Energy Storage Industry Development Report (2024)" —Industry technologies, development status and model projects[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(12): 4452-4463. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0834.

[7] 折晓会, 王星宇, 郭晓龙, 等. 超低温-高温跨温区相变材料制备及物性调控综述[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(12): 3818-3835. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0726.
SHE X H, WANG X Y, GUO X L, et al. A review on the preparation of ultra-low-temperature, high-temperature, and cross-temperature zone phase change materials and the regulation of physical properties[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(12): 3818-3835. DOI: 10.19799/j. cnki.2095-4239.2023.0726.

[8] 汤匀,朱书骏,柯旺松,等. 储热储冷技术全球发展态势分析[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 1119-1133. DOI: 10.19799/j. cnki. 2095-4239.2025.1176.
TANG Y, ZHU S J, KE W S, et al. An analysis of global development trends in thermal energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 1119-1133. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1176.

[9] 任天翔, 刑遵胜, 盛少杰, 等. 热能储存相变材料在建筑节能领域的研究进展[J/OL]. 化工新型材料, 1-9[2026-08-05]. https://doi. org/10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2026.11.045.
Ren T X, Xing Z S, Sheng S J, et al. Research Progress of Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in the Field of Building Energy Efficiency [J/OL]. New Chemical Materials, 1-9 [2026-08-05]. https://doi. org/10.19817/j. cnki. issn1006-3536.2026.11.045.

[10] 陈红兵, 胡珉潇, 李春阳, 等. 聚乙二醇2000-十二醇/石墨烯复合相变储能材料的制备与性能研究[J]. 功能材料, 2026, 57(2): 19-26. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2026.02.003.
CHEN H B, HU M X, LI C Y, et al. Preparation and performance

evaluation of polyethylene glycol 2000-capric alcohol/graphene composite phase change materials for thermal energy storage[J]. Journal of Functional Materials, 2026, 57(2): 19-26. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2026.02.003.

[11] 张鸿宇, 钱志强, 刘剑鑫, 等. 无机水合盐相变储能材料性能优化及应用进展[J]. 盐湖研究, 2024, 32(4): 91-103.
Zhang H Y, Qian Z Q, Liu J X, et al. Performance Optimization and Application Progress of Inorganic Hydrated Salt Phase Change Energy Storage Materials[J]. Salt Lake Research, 2024, 32(4): 91-103.

[12] 王闯,田禾青,郭茶秀,等.微掺杂氧化铝对共晶水合盐储热性能的影响[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(4): 1164-1172. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1102.
WANG C, TIAN H Q, GUO C X, et al. Influence of micro-dosage alumina on the heat storage performance of eutectic salt hydrate [J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(4): 1164-1172. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1102.

[13] 孙玮, 胡成志, 唐大伟. 二元共晶相变材料热物性研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(8): 2483-2488.
SUN Wei, HU Chengzhi, TANG Dawei. The study of thermal properties of binary eutectic phase change materials[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(8): 2483-2488.

[14] 张鸿宇, 钱志强, 刘剑鑫, 等. 无机水合盐相变储能材料性能优化及应用进展[J]. 盐湖研究, 2024, 32(4): 91-103. DOI: 10.3724/j.yhyj.2024021.
ZHANG H Y, QIAN Z Q, LIU J X, et al. Inorganic hydrated salt phase-change materials: property optimization and applications [J]. Journal of Salt Lake Research, 2024, 32(4): 91-103. DOI: 10.3724/j.yhyj.2024021.

[15] 郑炜博, 孙东, 李云飞, 等. 新型相变蓄热式电加热装置蓄热性能优化研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(9): 356-364. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2023.09.040.
ZHENG W B, SUN D, LI Y F, et al. Optimization of heat storage performance of a new phase change regenerative electric heating device[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(9): 356-364. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2023.09.040.

[16] 宋子龙. 管壳式潜热储存装置高效传热特性研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2025.SONG Z L. Research on high-efficiency heat transfer characteristics of shell-and-tube latent heat thermal energy storage devices[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2025.

[17] 张玉斌, 刁彦华, 赵耀华, 等. 电加热式平板微热管阵列相变蓄热器蓄放热性能研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(6): 1675-1680.
ZHANG Y B, DIAO Y H, ZHAO Y H, et al. Study on the heat storage and release performance of the electrical phase change storage heater with flat micro-heat pipe arrays[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(6): 1675-1680.

[18] 张岩岩, 熊亚选, 陈亚辉, 等. 相变填充床储热系统研究与应用进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(12): 3852-3872. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0543.
ZHANG Y Y, XIONG Y X, CHEN Y H, et al. Recent progress in the investigation and application of packed-bed latent thermal energy storage systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(12): 3852-3872. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0543.

[19] 马莉莎,谢宝珊,李传常.中低温相变填充床储热系统研究进展[J].洁净煤技术, 2025, 31(11): 115-131. DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.SUN25010901.
MA L S, XIE B S, LI C C. Progress in investigation and application of middle and low-temperature phase change packed bed thermal storage system[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31 (11): 115-131.DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.SUN25010901.

[20] 农欣露, 袁彬斌, 李闽华, 等. 螺旋盘管式过冷相变储热器动态释热特性研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 906-914. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0106.
NONG X L, YUAN B B, LI M H, et al. Dynamic heat release characteristics of a helical coil-type supercooled phase change thermal storage unit[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 906-914. DOI: 10.19799/j. cnki. 2095-4239.2026.0106.

[21] 刘云汉, 王亮, 张双, 等. 基于圆柱封装单元的水合盐相变储热填充床的储释特性实验研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(8): 2623-2633. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0187.
LIU Y H, WANG L, ZHANG S, et al. Experimental study on heat storage and discharge characteristics of packed bed based on hydrated salt using cylindrical encapsulation units[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(8): 2623-2633. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0187.

[22] 鲁博辉. 相变储热装置储放热特性及强化换热研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.LU B H. Study on charging and discharging characteristics of phase change thermal storage device and heat transfer enhancement[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.

[23] 段建国, 杨玲, 余心阳, 等. 相变储能散热器的储热/放热特性研究[J]. 现代化工, 2025, 45(S2): 226-231. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.2.040.
DUAN J G, YANG L, YU X Y, et al. Study on heat storage/release characteristics of phase change energy storage radiator[J]. Modern Chemical Industry, 2025, 45(S2): 226-231. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.2.040.

[24] 赵国富, 张健, 葛昆. 膨胀石墨/八水合氢氧化钡复合相变材料的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2021, 49(12): 179-182. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2021.12.038.
ZHAO G F, ZHANG J, GE K. Study on preparation and performance of expanded graphite/barium hydroxide octahydrate composite phase change material[J]. New Chemical Materials, 2021, 49(12): 179-182. DOI: 10.19817/j. cnki. issn1006-3536.2021.12.038.

[25] 陈久林,薛晓迪,王丽,等.基于中高温烟气余热回收的固体显热储热装置热性能实验研究[J]. 储能科学与技术,2025,14(8):3185-3193. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0110.
Chen J L, Xue X D, Wang L, et al. Experimental study on the thermal performance of a solid sensible heat storage device

based on medium-high temperature flue gas waste heat recovery [J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(8):3185-3193. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0110.

[26] 胡茜. 水合盐过冷行为分析及水合盐胶囊在建筑墙体中的应用热性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2025.HU Q. Analysis on supercooling behavior of hydrated salt and study on applied thermal performance of hydrated salt capsules in building wall[D]. Shanghai: Donghua University, 2025.

[27] 杨生. 面向中低温储热的赤藓糖醇相变材料储热性能提升研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.YANG S. Improvement of the heat storage performance of erythritol as a phase change material for low-to-medium temperature thermal energy storage[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2024.

[28] 邵雪峰. 面向中低温储热的糖醇相变材料储热性能综合评价及性能提升研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.SHAO X F. Comprehensive evaluation of the heat storage performance and its improvements for sugar alcohols as phase change materials for low-to-medium temperature latent heat storage[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.