

用于核电余热高效回收的梯级相变填充床 储热系统优化设计

李梦杰^{1,2}, 要可盈^{1,2}, 李明佳³, 刘占斌^{1,2}

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学热流科学与工程教育部
重点实验室, 710049, 西安; 3. 北京理工大学机械与车辆学院, 100081, 北京)

摘要: 针对铅铋堆核电系统在事故工况下余热管理的难题,提出了一种基于相变填充床储热技术(PLTES)的余热管理方法。通过建立受出口阈值温度约束的 PLTES 数值模型,分析了不同层级中相变材料(PCM)熔点与填充比例对单级与梯级 PLTES 系统热性能的影响规律。研究结果表明,在单级 PLTES 系统中,无论采用高熔点还是低熔点 PCM,均难以充分发掘 PCM 的显热与潜热潜能,导致系统容量利用率的最大值 $\eta_{\max}$ 仅能达到 74.17%。相比之下,采用梯级相变的 PLTES 系统的研究结果表明,通过在系统底层配置熔点低于红外探测阈值温度的 PCM,并在顶层使用熔点高于放热出口阈值温度的 PCM,可以在确保排放温度与环境温度相近的同时,显著提升系统的储能密度。通过精细调控顶层、中间层、底层 PCM 的无量纲熔点至 0.480、0.260、0.012,并设定填充比例为 0.52、0.44、0.04,优化后的梯级 PLTES 系统实现了高达 97.9% 的 PCM 固液相变参与率,并使得 $\eta_{\max}$ 达到了 87.22%。该研究为相变填充床储热在核电余热高效回收领域的应用提供了参考。

关键词: 填充床储热; 铅铋堆核电系统; 余热管理; 梯级相变; 容量利用率

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202503005 **文章编号:** 0253-987X(2025)03-0046-11

Optimization Design of a Cascaded Packed-Bed Latent Thermal Storage System for Efficient Waste Heat Recovery in Nuclear Power Plants

LI Mengjie^{1,2}, YAO Keying^{1,2}, LI Mingjia³, LIU Zhanbin^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Key Laboratory of
Thermo-Fluid Science and Engineering of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To address the challenge of waste heat management in lead-bismuth-cooled nuclear reactor systems during accident scenarios, a waste heat management method based on packed-bed latent thermal energy storage (PLTES) is proposed. By establishing a numerical model of PLTES constrained by an outlet threshold temperature, this paper analyzes the effects of phase-change materials (PCM) melting points and filling ratios on the thermal performance of single-stage and cascade PLTES systems. The research results show that in the single-stage PLTES system, regardless of the use of high or low melting point PCM, it is difficult to fully exploit the sensible

收稿日期: 2024-10-08。 作者简介: 李梦杰(1994—),女,助理教授;李明佳(通信作者),女,教授,博士生导师。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52306273);中国科协第九届青年人才托举工程资助项目(2023QNRC001)。

网络出版时间: 2024-12-09

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241206.1545.002>

and latent heat potential of PCM, resulting in a maximum system capacity utilization rate η_{ma} of only 74.17%. In contrast, the research on cascade PLTES systems indicates that by placing PCM with melting points below the infrared detection threshold temperature at the bottom of the system and using PCM with melting points higher than the heat release outlet threshold temperature at the top layer, it is possible to significantly increase the system's energy storage density while ensuring that the emission temperature is close to the ambient temperature. Through precise adjustment of the melting points and filling ratios of PCM at each level, the optimized cascade PLTES system (with dimensionless melting points of top, middle, and bottom layer PCM being 0.480, 0.260, 0.012 respectively, and filling ratios of 0.52, 0.44, 0.04) achieves a PCM solid-liquid phase change participation rate of 97.9% and η_{ma} of 87.22%. This research provides reference for the application of packed bed thermal energy storage in the efficient recovery of waste heat in nuclear power plants.

Keywords: packed-bed latent thermal energy storage; lead-bismuth reactor nuclear power system; waste heat management; cascaded phase change; capacity utilization rate

铅铋堆核电系统具有灵活、高效和环保的特点,是第四代核能系统的参考堆型之一^[1-2]。在核反应堆发生事故或异常工况后,例如停堆、冷却剂泵故障等,由于放射性衰变反应堆堆芯仍会持续产热。为了保障反应堆安全,必须及时将堆芯内的余热导出并排放到环境中,最终排放温度通常可超过 100℃。然而,在某些特殊的应用场景中,余热排出温度需低于红外监测仪的探测阈值,一般要求余热排放温度与环境温度的差异不超过 4℃。然而,目前核电系统事故余热排放方案难以满足这一要求。将储热技术(TES)耦合到铅铋堆核电系统中,可以将事故余热存储在储热材料中,通过对热量缓慢释放或再利用来进行余热管理。采用 TES 对热量进行时空转移,可以快速应对核电事故工况下的高余热冲击,是解决特殊应用场景下核电事故工况下余热管理的有效途径之一^[3]。

在众多的储热技术中,相变填充床式储热装置(PLTES)具有显著的优势^[4-5]。一方面,利用相变材料(PCM)在固液相变过程中的恒温特性,可有效满足储放热过程中的出口温度要求;另一方面,填充床结构中储热材料与传热工质接触面积较大,使得其储放热速率快于管壳式和圆柱式储热结构,能够迅速吸收铅铋堆核电系统的余热。国内外学者通过实验与理论研究,探讨了物性参数、装置结构和运行工况等因素对 PLTES 系统储放热特性的影响^[6-8]。

Karthikeyan 等^[9]采用了多种建模方法来描述填充床相变储热器的储传热过程,通过将数值计算结果与实验结果对比发现,与传热流体的对流换热相比,相变储热球间轴向热传导的影响可以忽略不

计,而储热球内的相变材料内部热传导不可忽略。Cascetta 等^[10]使用一维 Schumann 模型对填充床式储热器在导热油、熔盐和空气 3 种不同传热流体(HTF)下的瞬态特性进行了模拟研究,结果表明,经过 5 次储放热循环后,3 种储热器的热效率均下降了约 30%,其中采用空气的储热器性能最差。然而,与导热油或熔盐相比,空气作为 HTF 时,流体与固体之间的化学相容性问题较少^[11]。此外,PLTES 系统中的储罐结构也会直接影响储热效率。一般而言,优选高径比大于 1 的圆柱形储罐,但同时考虑技术要求和成本^[12]。Guo 等^[13]通过实验和数值模拟研究了不同入口温度和入口质量流量的空气对 PLTES 系统储放热性能的影响,并将数值模型推广为无量纲模型。研究结果表明,当 Pe 数从 188 增加到 388 时,系统的储热时间减少了 44.7%,放热时间减少了 34.7%,热效率从 65.6% 提升至 80.1%。张媛媛等^[14]通过数值模拟研究了双层 PLTES 系统中不同 PCM 熔点和填充比例 h 的储放热特性。结果表明,将熔点较高的 PCM 置于储罐入口位置可以提高 PLTES 系统的放热效率。当填充比例为 0.85 时,相较于单层高熔点储热器,放热效率可提高 3%。

本课题组在 PLTES 系统的理论与实验研究方面开展了相关工作。Wu 等^[15]通过数值模拟研究了相变材料熔点、储热球尺寸、传热流体质量流量等因素对 PLTES 系统储放热性能的影响规律。研究结果表明,提高 PCM 的熔点、降低 HTF 质量流量以及减小储热球的直径,均可在不同程度上提升放热速率。进一步研究采用了梯级相变储热技术来增

强装置的储放热性能。研究结果表明,与单级储热装置相比,梯级 PLTES 系统在储热速率和效率上均有所提升^[16]。Li 等^[17]研究了在出口阈值温度限制下,梯级 PLTES 系统中 PCM 熔点分布对实际储热量的影响规律,并提出了一种以储热材料有效利用率最大为目标的梯级 PCM 熔点设计准则。在实验研究方面,Li 等^[18]使用了熔点为 395.1℃的三元碳酸盐作为相变储热材料,采用不锈钢金属球进行封装,空气作为传热流体,储热运行温度范围为 350~450℃。实验结果表明,该 PLTES 系统的储热与放热速率分别是相同工况条件下管壳式相变储热器的 1.8 倍与 3.2 倍。进一步地,提出了沿流动方向相变储热球球径减小的变球径 PLTES 系统。实验结果表明,在相同运行工况条件下,两层变球径储热器的储放热性能优于单层储热器,储热速率最大可提高 12.4%,储热速率密度最大可提高 13.0%^[19]。

在铅铋堆核电系统的余热回收中,PLTES 系统面临双重挑战。一方面,由于某些特殊应用需求,余热排放温度(即储热过程出口温度)必须低于红外探测温度;另一方面,由于对热利用的品质要求,余热利用温度(即放热过程出口温度)需高于特定需求值。因此,该 PLTES 系统在储放热过程中受到出口阈值温度的严格限制。此外,储热器中斜温层的存在进一步导致了其实际储放热性能低于设计预期。文献[20]指出,出口阈值温度对相变储热系统的有效储热密度具有显著影响。然而,目前 PLTES 系统的储放热性能强化研究中对出口阈值温度影响的考虑仍然不足,尤其是在铅铋堆核电系统的特殊应用场景中,这使得 PCM 熔点分布、填充比例等优化结果难以直接适用。

针对上述问题,本文对应用于铅铋堆核电系统余热回收的填充床梯级相变储热系统进行了设计优化。首先,建立了在出口阈值温度约束下的 PLTES 系统数值模型。接着,研究了 PCM 熔点和填充比例对单级与梯级储热系统热性能的影响,并分析了储热与放热结束时 PCM 的温度分布和相变情况,揭示了在阈值温度约束条件下 PLTES 系统的储放热性能。最后,基于研究结果提出了适用于铅铋堆核电系统余热回收的最优 PLTES 系统参数,为其设计提供了理论指导与技术依据。

1 相变填充床储热系统模型建立

1.1 用于核电余热回收的 PLTES 运行过程

本文研究对象是应用于铅铋堆核电系统事故工

况下余热回收的相变填充床储热装置,其传热流体为空气。系统的余热回收储热过程与余热利用放热过程如图 1 所示。在储热过程中,当核电系统发生事故时,PLTES 开始运行。来自反应堆冷却后的高温气体直接流入 PLTES,在储热器中与低温 PCM 进行热交换,并将热量存储于 PCM 中。流出储热器的空气温度 $T_{C,out}$ 低于探测温度(即储热出口阈值温度 $T_{C,th}$),空气直接排入外界环境,而在储热运行后期,由于储热器内存在斜温层, $T_{C,out}$ 会逐渐上升。当 $T_{C,out}$ 超过 $T_{C,th}$ 时,为满足余热排放温度要求,需要使用空气旁通系统来冷却最终排入环境的空气。在放热过程中,风机从外界环境抽取常温空气,与储热器内的高温 PCM 进行换热。吸收热量后,高温气体流入换热器,为用户提供热能。为了满足余热利用时对热能品位的要求(即放热出口阈值温度 $T_{D,th}$), $T_{D,out}$ 应高于 $T_{D,th}$ 。随着放热过程进行, $T_{D,out}$ 逐渐下降,当 $T_{D,out}$ 低于 $T_{D,th}$ 时,放热过程停止。PLTES 系统的运行参数见表 1。

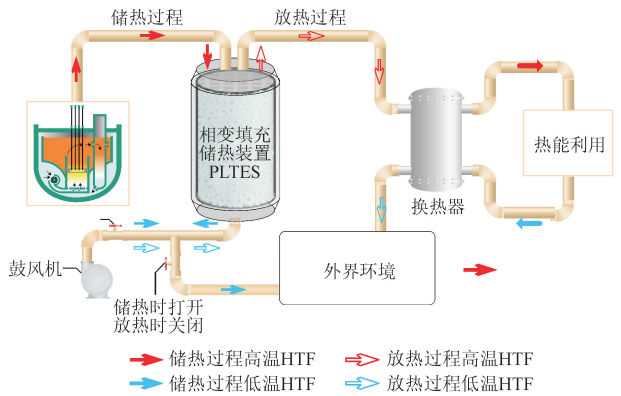


图 1 铅铋堆核电系统中 PLTES 系统储放热过程示意图
Fig. 1 Charging and discharging process of PLTES system in lead-bismuth reactor

表 1 PLTES 系统运行参数

Table 1 Operation parameters of PLTES system	
参数	数值
储热过程进口温度 $T_{C,in}/^{\circ}\text{C}$	200
储热过程出口阈值温度 $T_{C,th}/^{\circ}\text{C}$	34
储热过程 HTF 质量流量 $q_{m,C}/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	0.9
储热时间 τ_C/h	8
放热过程进口温度 $T_{D,in}/^{\circ}\text{C}$	30
放热过程出口阈值温度 $T_{D,th}/^{\circ}\text{C}$	100
放热过程 HTF 质量流量 $q_{m,D}/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	0.9
放热时间 τ_D/s	实际计算所得

PLTES 物理模型如图 2 所示,主要由均流器、填充床、罐体与保温层组成。填充床区域高 H_{bed} 为

2.83 m, 直径 D_{bed} 为 1.75 m, 由均匀填充的内直径 d_p 为 30 mm、壁厚 b_s 为 2 mm 的相变储热球组成, 填充床孔隙率 ϵ 为 0.396。储热器罐体的钢板壁面厚 b_w 为 6 mm, 钢板外的保温层厚度 b_{ins} 为 2 cm。根据事故工况下余热排放时间、余热排放温度要求以及余热利用时热能品位需求, 初步采用 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 作为储热球内填充的备选 PCM 材料, 其熔点温度 T_m 为 32°C , 密度为 $1485 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 相变焓 ΔH_m 为 $254 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 导热系数为 $0.544 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 比定压热容为 $1.93 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [21]。值得说明的是, 团队的前期研究结果表明, 在储放热出口阈值温度约束条件下, PCM 熔点对系统效率有显著影响 [20], 因此 PCM 熔点是本研究的主要分析变量。在后续计算中, 尽管分析了不同 PCM 熔点对储热装置性能的影响变化, 其物性参数仍基于 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, 仅调整熔点温度。

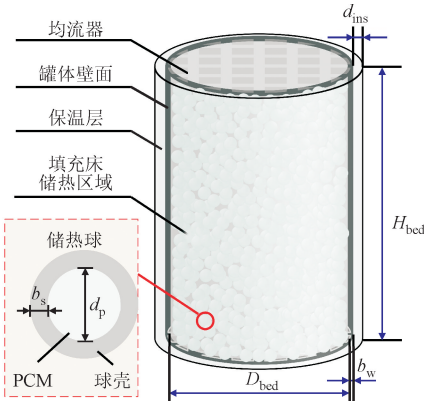


图2 PLTES 物理模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of PLTES physical model

1.2 数学模型

为简化计算, 对 PLTES 系统储放热过程进行合理假设: ①储热器内孔隙率均匀, 相变储热球均匀排布; ②HTF 视为不可压缩流体, 在储热器内只沿着轴向进行均匀流动与传热; ③忽略储热器辐射损失。基于以上假设, 采用一维瞬态同心扩散模型(D-C 模型)进行 PLTES 的流动换热过程计算。HTF 与 PCM 的能量控制方程、初始条件和边界条件如下。

1.2.1 能量控制方程

HTF 的能量方程为

$$\epsilon \rho_F c_{p,F} \frac{\partial T_F}{\partial \tau} + \rho_F c_{p,F} u_F \frac{\partial T_F}{\partial x} = \lambda_{F,\text{eff}} \frac{\partial^2 T_F}{\partial x^2} + h_V (T_{p,r=d_p/2} - T_F) + h_a \frac{\pi D_{\text{bed}}}{A_{\text{bed}}} (T_a - T_F) \quad (1)$$

PCM 的能量方程为

$$\rho_P c_{p,P} \frac{\partial T_P}{\partial \tau} = \lambda_{P,\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 T_P}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_P}{\partial r} \right) \quad (2)$$

式中: x 表示储热罐体的高; r 表示储热球的径向距离; T_F 、 T_P 与 T_a 分别表示 HTF、PCM 与空气的温度; ρ_F 与 ρ_P 分别表示 HTF 与 PCM 的密度; $c_{p,F}$ 与 $c_{p,P}$ 分别表示 HTF 与 PCM 的比定压热容; u_F 为 HTF 流速; τ 表示时间; h_a 为储热器与外界环境的总换热系数; h_V 为 HTF 与 PCM 的单位体积换热系数; A_{bed} 表示储热器填充床区域的横截面积, $A_{\text{bed}} = (1/4)\pi D_{\text{bed}}^2$; $\lambda_{F,\text{eff}}$ 与 $\lambda_{P,\text{eff}}$ 分别表示 HTF 与 PCM 的有效导热系数; $\lambda_{\text{all},\text{eff}}$ 为采用单相热平衡模型时填充床轴向有效导热系数, 由下式 [22] 进行计算

$$\begin{cases} \lambda_{F,\text{eff}} = \begin{cases} 0.7\epsilon\lambda_F, & Re \leq 0.8 \\ 0.5PrRe\lambda_F, & Re > 0.8 \end{cases} \\ \lambda_{P,\text{eff}} = \lambda_{\text{all},\text{eff}} - \lambda_{F,\text{eff}} \\ \lambda_{\text{all},\text{eff}} = \lambda_F (\lambda_P/\lambda_F)^m + 0.5\lambda_F PrRe \\ m = 0.28 - 0.757\ln\epsilon - 0.057\ln(\lambda_P/\lambda_F) \end{cases} \quad (3)$$

式中: λ_F 、 λ_P 分别为 HTF、PCM 的导热系数。 h_V 由下式 [23] 计算获得

$$h_V = \frac{6(1-\epsilon)\lambda_F}{d_p^2} (2 + 1.1(Re^{0.6} Pr^{1/3})) \quad (4)$$

储热器与环境的热损失 h_a 涉及储热器内 HTF 与罐壁的对流换热、罐壁的导热以及保温层的导热 3 个传热环节。 h_a 由下式 [24-25] 计算获得

$$\begin{cases} \frac{1}{h_a} = \frac{1}{h_i} + \frac{D_{\text{bed}}}{2} \sum_{j=1}^2 \frac{1}{\lambda_j} \ln\left(\frac{D_{j+1}}{D_j}\right) \\ h_i = \frac{\lambda_F}{d_p} ((0.203Re^{1/3} Pr^{1/3}) + (0.220Re^{0.8} Pr^{0.4})) \end{cases} \quad (5)$$

式中: h_i 为对流换热系数; $j=1$ 表示储热器内壁面; $j=2$ 表示储热器外壁面; $j=3$ 表示罐壁, 即保温层外层。

式(4)~式(5)中的 Pr 与 Re 定义如下

$$\begin{cases} Pr = c_{p,F} \mu_F / \lambda_F \\ Re = \rho_F u_F d_p / \mu_F \end{cases} \quad (6)$$

式中: μ_F 为动力黏度。相变过程采用显热容法进行描述 [17], 即认为相变发生在一个很小的温度区间 ($\Delta T_m = T_{m2} - T_{m1}$), 在这个温度区间内 PCM 具有很大的比定压热容。PCM 的比定压热容如下式

$$c_{p,P} = \begin{cases} c_{p,P,s}, & T_P \leq T_{m1} \\ \frac{c_{p,P,s} + c_{p,P,l}}{2} + \frac{\Delta H_m}{T_{m2} - T_{m1}}, & T_{m1} < T_P \leq T_{m2} \\ c_{p,P,l}, & T_P > T_{m2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $c_{p,P,s}$ 与 $c_{p,P,l}$ 分别表示固态与液态形式 PCM 的比定压热容。

1.2.2 初始条件与边界条件

储热器在储放热过程开始前,储热器内部所有储热材料与传热工质温度都处于运行温度的最低值,即环境温度($T_a = 30\text{ }^\circ\text{C}$)。因此,模型的初始条件为 $T_F = T_P = T_a$, $\tau = 0$ 。

HTF 边界条件如下

$$\begin{cases} T_F = T_{C,\text{in}}, & x = 0 \\ \frac{\partial T_F}{\partial x} = 0, & x = H_{\text{bed}} \end{cases} \quad (8)$$

PCM 边界条件如下

$$\begin{cases} \frac{\partial T_P}{\partial \tau} = 0, & r = 0 \\ \lambda_P \frac{\partial T_P}{\partial r} = h_v(T_F - T_P), & r = \frac{d_P}{2} \end{cases} \quad (9)$$

上述控制方程通过有限差分法进行求解,使用全隐式格式。其中,瞬态项和对流项采用一阶迎风格式进行离散,扩散项采用二阶中心差分格式进行离散。经过时间步长与网格步长考核后,最终填充区域轴向网格步长选择为 0.01 m ,每个储热球内径向网格步长为 0.001 m ,时间步长为 1 s 。通过对比模拟结果与实验数据来验证模型的准确性。在模拟过程中,储热器的结构、材料及运行参数与文献[18]实验数据保持一致。图3给出了储热器内无量纲高度($x \cdot H_{\text{bed}}^{-1}$)为 0.25 、 0.50 与 0.75 处 PCM 实验温度与模拟温度的变化情况。由图3可见,由于实验误差和数值模型的简化,实验结果与模拟结果存在一定的差异。但总体而言,模拟结果与实验结果吻合较好,储热球内 PCM 温度的模拟结果与实验结果最大误差为 6.8% ,说明本文建立的 PLTES 系统数值模型是可靠的。

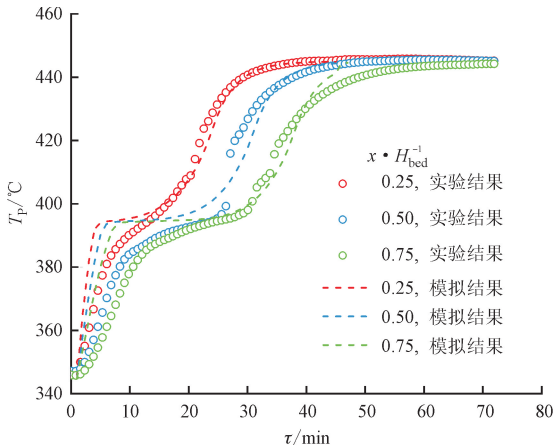


图3 储热器内无量纲高度为 0.25 、 0.50 与 0.75 处 PCM 实验温度与模拟温度的变化

Fig.3 Variations of PCM experimental and simulation temperature at the dimensionless heights of 0.25 , 0.50 and 0.75 in the tank

1.3 参数的定义

1.3.1 无量纲参数定义

为满足铅铋堆核电系统在特殊场景应用时余热排放温度与热能品位需求,系统中储热器储热过程出口温度应低于 $T_{C,\text{th}}$,放热过程出口温度应高于 $T_{D,\text{th}}$,储热、放热过程无量纲出口阈值温度分别定义如下

$$\begin{cases} \theta_{C,\text{th}} = \frac{T_{C,\text{th}} - T_{D,\text{in}}}{T_{C,\text{in}} - T_{D,\text{in}}} = 0.024 \\ \theta_{D,\text{th}} = \frac{T_{D,\text{th}} - T_{D,\text{in}}}{T_{C,\text{in}} - T_{D,\text{in}}} = 0.412 \end{cases} \quad (10)$$

对储热器内 PCM 熔点温度 T_M 、 T_P 、 T_F 、 x 与 h 等参数进行无量纲化,对无量纲 PCM 熔点温度 θ_M 、无量纲 PCM 温度 θ_P 、无量纲 HTF 温度 θ_F 、无量纲储热罐体高 x^* 和无量纲填充比例 h^* 分别定义如下

$$\begin{cases} \theta_M = \frac{T_M - T_{D,\text{in}}}{T_{C,\text{in}} - T_{D,\text{in}}}; \theta_P = \frac{T_P - T_{D,\text{in}}}{T_{C,\text{in}} - T_{D,\text{in}}} \\ \theta_F = \frac{T_F - T_{D,\text{in}}}{T_{C,\text{in}} - T_{D,\text{in}}}; x^* = \frac{x}{H_{\text{bed}}}; h^* = \frac{h}{H_{\text{bed}}} \end{cases} \quad (11)$$

储热器储热过程中无量纲入口温度 $\theta_{C,\text{in}} = 1$,放热过程中无量纲入口温度 $\theta_{D,\text{in}} = 0$ 。忽略储热器中温度梯度较小的部分,定义 θ_P 在 $0.10 \sim 0.90$ 范围内所对应的垂直距离为斜温层厚度。将储热或放热过程中的斜温层厚度^[26] h_C 、 h_D 进行无量纲化,得到无量纲斜温层厚度 h_C^* 、 h_D^* ,定义式如下

$$h_C^* = \frac{h_C}{H_{\text{bed}}}; h_D^* = \frac{h_D}{H_{\text{bed}}} \quad (12)$$

1.3.2 有效储热率

有效储热率 η_C 定义为在储热过程中,储热器实际储热量 Q_C 与核电事故过程总的余热量 Q_{tot} 之比

$$\eta_C = \frac{Q_C}{Q_{\text{tot}}} \quad (13)$$

式中: Q_C 与 Q_{tot} 根据下式计算获得

$$Q_C = \int_0^{\tau_{C,\text{eff}}} q_{m,C} C_{p,F} (T_{C,\text{in}} - T_{C,\text{out}}(\tau)) d\tau \quad (14)$$

$$Q_{\text{tot}} = \tau_C q_{m,C} C_{p,F} (T_{C,\text{in}} - T_a) \quad (15)$$

式中: $\tau_{C,\text{eff}}$ 为有效储热时间,表示储热过程中从开始储热至储热器出口温度上升到阈值温度的时间; τ_C 为总的储热时间,即反应堆事故余热排放时间。

1.3.3 有效放热率

有效放热率 η_D 用来衡量放热过程中热能的有效利用情况,定义为储热器实际放热量 Q_D 与实际储热量 Q_C 之比

$$\eta_D = \frac{Q_D}{Q_C} \quad (16)$$

其中 Q_D 由下式计算获得

$$Q_D = \int_0^{\tau_{D,eff}} q_{m,D} c_{p,F} (T_{D,out}(\tau) - T_{D,in}) d\tau \quad (17)$$

式中: $\tau_{D,eff}$ 为有效放热时间,表示放热过程中从开始放热至储热器出口温度降低到阈值温度的时间。

1.3.4 容量利用率

容量利用率 η_{ma} 定义为实际放热量 Q_D 与储热器在运行温度范围内所能储存的最大热量 Q_{ideal} 之比,反映了整个循环过程中储热材料的有效利用情况,其定义式如下

$$\eta_{ma} = \frac{Q_D}{Q_{ideal}} \quad (18)$$

其中 Q_{ideal} 由下式计算获得

$$Q_{ideal} = (1 - \epsilon) A_{bed} H_{bed} \rho_P [c_{p,P} (T_{C,in} - T_{D,in}) + \Delta H_m] + \epsilon A_{bed} H_{bed} \rho_F c_{p,F} (T_{C,in} - T_{D,in}) \quad (19)$$

1.3.5 PCM 固液相变参与率

固液相变参与率 R_{PCM} 指储放热循环结束后, PLTES 系统中发生固液相变 PCM 质量与在储热器内 PCM 总质量之比,是用来评价相变材料利用潜热储热能力的性能指标。

2 单级 PLTES 系统储放热特性

2.1 熔点对单级 PLTES 系统储热性能的影响

PCM 无量纲熔点温度对单级 PLTES 系统有效储热率、有效放热率和容量利用率的影响关系如图 4 所示。由图 4 可见:根据单级 PLTES 系统中 η_{ma} 的变化, θ_M 被放热过程出口阈值温度 $\theta_{D,th}$ 分为两段。当 $\theta_M < \theta_{D,th}$ 时,随着 θ_M 的增大, η_{ma} 逐渐增大,由 58.88% ($\theta_M = 0.012$) 提高到 69.32% ($\theta_M = 0.400$); 当 $\theta_M > \theta_{D,th}$ 后,随着 θ_M 的增大, η_{ma} 逐渐减小,由 75.75% ($\theta_M = 0.450$) 降低至 48.88% ($\theta_M = 0.950$)。

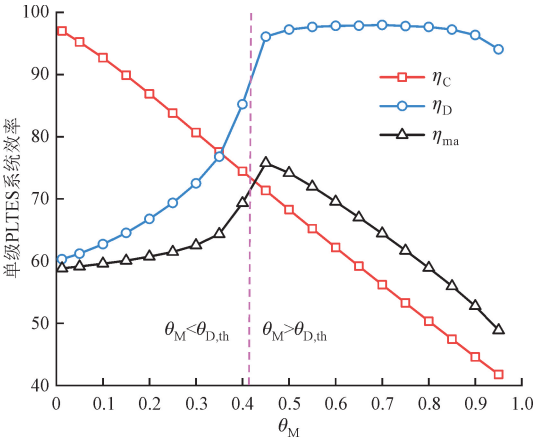


图 4 单级 PLTES 系统中 η_c 、 η_D 、 η_{ma} 随 θ_M 的变化
Fig. 4 Variations of η_c , η_D , and η_{ma} for non-cascaded PLTES system with different θ_M

在两个区间内,分别取 $\theta_M = 0.012$ 和 $\theta_M = 0.450$ 为例,分析单级 PLTES 系统的动态特性,其储热与放热过程的出口温度与热量变化情况分别如图 5(a) 与 5(b) 所示。

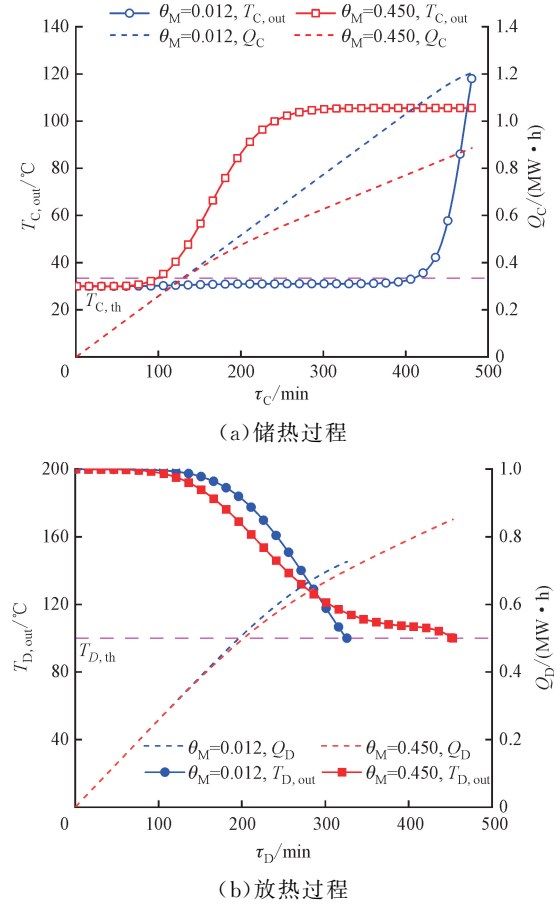


图 5 单级 PLTES 系统出口温度与热量变化情况
Fig. 5 Variations of T_{out} and Q of non-cascaded PLTES system

针对储热过程,由于储热过程中受相变储热技术内部斜温层特性影响, PLTES 系统出口温度不断上升,且在较长时间内保持在熔点附近。如图 5(a) 所示:当采用 θ_M 为 0.012 的 PCM, 储热器有 414 min 出口温度保持在阈值温度 34℃ 以下, 8 h 内有效储热量为 1 204.32 kW·h; 当 $\theta_M = 0.450$ 时, 储热器有效储热时间仅为 102 min, 有效储热量为 885.98 kW·h。同时, 由图 5(a) 可见, 两种储热器的有效储热时间均小于储热时间 ($\tau_C = 8$ h) 要求, 都需要使用空气旁通系统对储热器出口温度进行冷却。在本研究的铅铋堆核电系统余热回收中, 由于余热排放时间与功率一定, 单级 PLTES 系统中 PCM 的 θ_M 越大, 储热器出口温度越高, 空气旁通系统吸收的热量越多, 有效存储在 PCM 中的热量越少, 即 η_C 降低。

针对放热过程,由于储热器出口温度降低至 $\theta_{D,th}$ 后随即停止,放热时间 τ_D 即为有效放热时间。由图 4 可见,根据 η_D 的变化, θ_M 被 $\theta_{D,th}$ 分为两段。当 $\theta_M < \theta_{D,th}$ 时, η_D 随 θ_M 增大而增大,而当 $\theta_M > \theta_{D,th}$ 后, η_D 变化不大,可保持在 97% 左右。由图 5(b) 可见, $\theta_M = 0.450$ 时,由于其相变温度较高,从而使得储热器内被 PCM 加热的流体温度高于放热阈值温度,因此满足放热要求的时间长,即有效放热时间长。 $\theta_M = 0.450$ 时的有效放热时间为 453 min,高于 $\theta_M = 0.012$ 条件下的 326 min,因此实际放热量也更大。

2.2 内部 PCM 热量利用情况

由 θ_M 不同造成 η_C 、 η_D 和 η_{ma} 的差异,可归因于储热与放热过程结束时 PCM 内部的温度分布与相变状态的显著差异。图 6 与图 7 分别展示了 $\theta_M = 0.012$ 与 $\theta_M = 0.450$ 时,单级 PLTES 系统储放热结束时 PCM 温度分布图与液相分数 f_L 分布图。

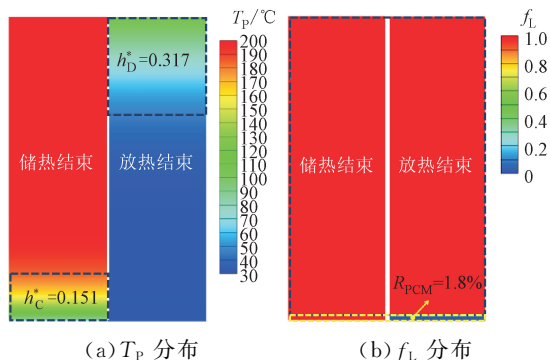


图 6 $\theta_M = 0.012$ 单级 PLTES 系统储放热结束时刻 T_P 与 f_L 分布

Fig. 6 Distribution of T_P and f_L for non-cascaded PLTES system with $\theta_M = 0.012$ at the final states of charging and discharging processes

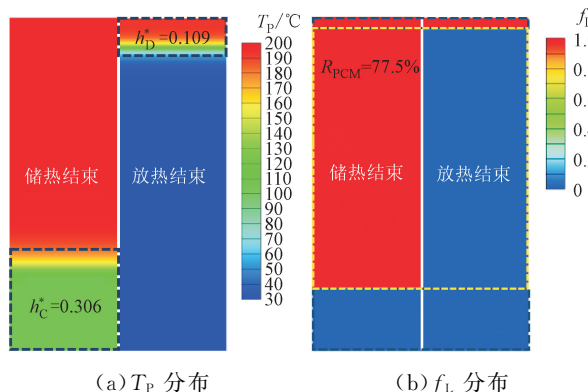


图 7 $\theta_M = 0.450$ 单级 PLTES 系统储放热结束时刻 T_P 与 f_L 分布

Fig. 7 Distribution of T_P and f_L for non-cascaded PLTES system with $\theta_M = 0.450$ at the final states of charging and discharging processes

首先,由图 6(a)、图 7(a)可见,储热结束时, θ_M 为 0.450 的储热器由于底部的 PCM 温度处于相变温度,介于定义的斜温层温度范围内,因此底部斜温层较厚 ($h_{C,0.012}^* < h_{C,0.450}^*$),表明储热过程未有效利用 PCM 的显热储热能力。在放热结束时刻, θ_M 为 0.012 时储热器由于受放热过程出口阈值温度的约束,其有效放热时间低于 θ_M 为 0.450 的储热器,导致顶部的斜温层还未完全排出就已经停止运行,因此其顶部斜温层较厚 ($h_{D,0.012}^* > h_{D,0.450}^*$),放热过程未完全释放 PCM 储存的显热量。说明由于斜温层的存在,储热器内部分为高温区和低温区,并非全部 PCM 能够有效参与热能的储存与释放,从而降低了系统显热的实际利用率,使之低于理论设计预期。

其次,由图 6(b)、图 7(b)可见,在完成一次完整的储放热循环后, θ_M 为 0.012 时储热器内有 98.2% 的 PCM 一直处于液体状态,仅 1.8% 的 PCM 发生了固液相变,表明该工况未有效利用 PCM 的潜热储热能力;相比之下, θ_M 为 0.450 时储热器内有 77.5% 的 PCM 发生了固液相变,但仍有 3.5% 的 PCM 保持液态,而 19.0% 保持固态,这两部分 PCM 均未经历相变,从而未能有效利用其相变潜热进行热能存储。说明在储热与放热过程中,受出口阈值温度的限制,储热系统内的 PCM 不能完全熔化或凝固,导致有效利用的潜热量降低。

综上所述,对于低熔点 ($\theta_M < \theta_{D,th}$) 单级 PLTES 而言,放热阶段储热器内斜温层较厚,且 PCM 发生相变的比例极小;而对于高熔点 ($\theta_M > \theta_{D,th}$) 单级 PLTES 面临相似的问题,存在较多的 PCM 未发生相变,PCM 固液相变参与率低。整体上,单级 PLTES 系统在储放热过程中难以同时高效利用 PCM 的显热与潜热,导致储热材料容量利用率低。因此,采用梯级储热技术,合理匹配相变点与填充比例,是提升储热器热性能的关键途径。

3 梯级 PLTES 系统储放热特性

本节采用了三级梯级 PLTES 系统,底部区域填充低熔点 PCM,而顶部区域填充高熔点 PCM。鉴于余热排放温度的关键需求,系统底层 PCM 无量纲熔点温度 $\theta_{M,b}$ 应低于放热出口阈值温度 $\theta_{D,th}$,因此选择了熔点为 32 °C 的 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 作为底层 PCM,其对应的无量纲温度 $\theta_{M,b}$ 为 0.012。

3.1 PCM 熔点分布的影响

为明确 PCM 无量纲熔点温度对梯级 PLTES 系统有效储热率、有效放热率和容量利用率的影响,采用各层级无量纲填充比例均等的储热器开展研

究。图 8 为顶层无量纲熔点温度 $\theta_{M,t}$ 与中间层无量纲熔点温度 $\theta_{M,m}$ 变化对储热器 η_C 、 η_D 、 η_{ma} 的影响规律。图 8 中,每个数据点代表一种特定的熔点温度组合的储热器,将其命名为熔点温度三角,且这些点均满足 $\theta_{M,t} > \theta_{M,m} > \theta_{M,b}$ 的关系。

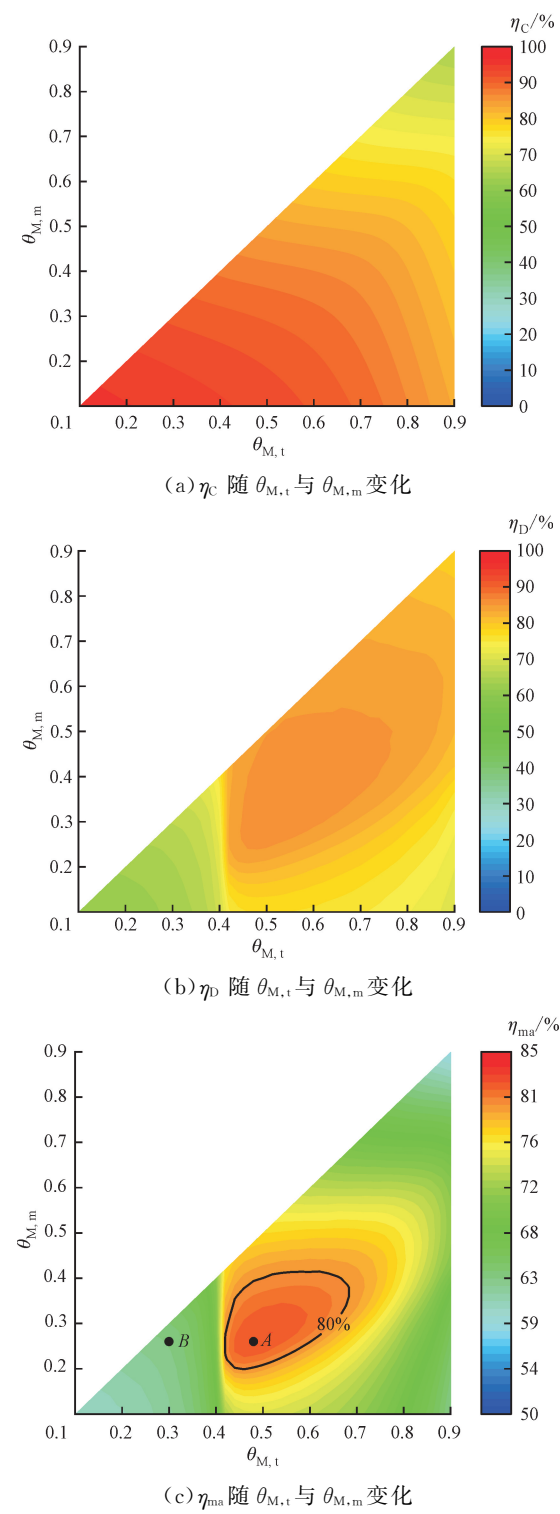


图 8 梯级 PLTES 系统中 η_C 、 η_D 、 η_{ma} 随 $\theta_{M,t}$ 与 $\theta_{M,m}$ 变化
Fig. 8 Distribution of η_C , η_D , and η_{ma} for cascaded PLTES system with different $\theta_{M,t}$ and $\theta_{M,m}$

由图 8(a) η_C 的熔点温度三角可见,随着 $\theta_{M,t}$ 与 $\theta_{M,m}$ 的增加, η_C 由 95.75% ($\theta_{M,t} = 0.10, \theta_{M,m} = 0.10$) 逐渐降低至 64.92% ($\theta_{M,t} = 0.90, \theta_{M,m} = 0.90$)。这一趋势表明,过高的顶层与中间层 PCM 熔点温度不利于系统储热效率的提升。

由图 8(b) η_D 熔点温度三角可见,当 $\theta_{M,t}$ 低于 $\theta_{D,th}$ 时, η_D 普遍维持在较低水平(约 65%)。然而,一旦 $\theta_{M,t}$ 超过 $\theta_{D,th}$, η_D 将显著上升,并在 $\theta_{M,t} = 0.54$ 且 $\theta_{M,b} = 0.32$ 达到最大值 86.08%。这是由于在放热过程中,储热器出口温度能较长时间维持在接近顶层 PCM 无量纲熔点温度的水平,从而延长了有效放热时间,并提升了高温 PCM 与低温 HTF 换热后的实际放热量。

由图 8(c) η_{ma} 熔点温度三角可见,类似地, $\theta_{M,t}$ 同样被 $\theta_{D,th}$ 分为两个区间。当 $\theta_{M,t}$ 与 $\theta_{M,m}$ 分别在 (0.42, 0.66) 与 (0.22, 0.40) 范围内变化时,梯级储热器 η_{ma} 能保持在 80% 以上,并在结构 A ($\theta_{M,t}, \theta_{M,m}, \theta_{M,b}$ 分别为 0.480, 0.260, 0.012) 处取得最大值 82.11%。在两个区间内,分别取结构 A 和结构 B ($\theta_{M,t}, \theta_{M,m}, \theta_{M,b}$ 分别为 0.300, 0.260, 0.012) 为例,分析两个区间内储热器储放热结束时刻 PCM 的温度分布与熔化凝固情况,结果如图 9 与图 10 所示。

通过对比分析图 9 与图 10 可知,不同 $\theta_{M,t}$ 对储热器性能的影响主要体现在放热阶段。具体而言,由 PCM 温度分布图可见,放热结束时,结构 B 内部斜温层远高于结构 A,这直接反映了结构 B 释放的显热量低于结构 A。进一步,由 PCM 液相分数图可见,完成储放热循环后,结构 B 内 PCM 固液相变参与率 R_{PCM} 仅为 22.5%,远低于结构 A 的 67.6%。由此说明,当 $\theta_{M,t}$ 小于 $\theta_{D,th}$ 时,储热器内有效利用的显热量与潜热量均会受到抑制。因此,为提升系统性能,建议在梯级 PLTES 的顶层采用熔点温度高于阈值温度的 PCM 作为储热材料。

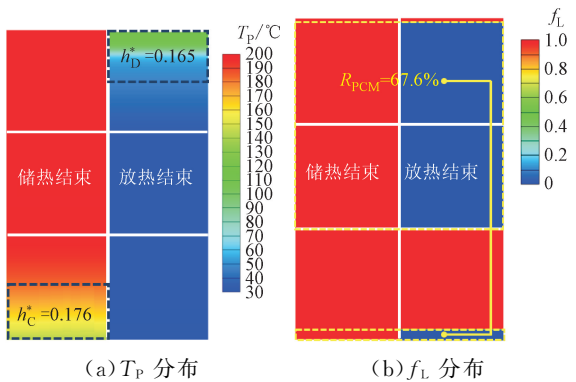


图 9 结构 A 梯级 PLTES 系统储放热结束时刻 T_P 与 f_L 分布
Fig. 9 Distribution of T_P and f_L for cascaded PLTES system with structure A at the final states of charging and discharging processes

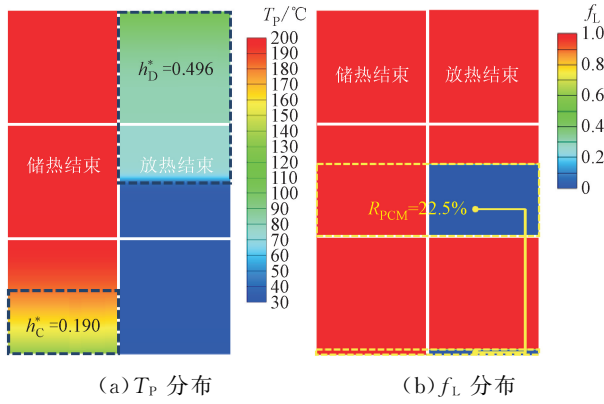


图 10 结构 B 梯级 PLTES 系统储放热结束时刻 T_P 与 f_L 分布

Fig. 10 Distribution of T_P and f_L for cascaded PLTES system with structure B at the final states of charging and discharging processes

此外,由图 9(b)可见,在结构 A 中,尽管有 67.6% 的 PCM 完成了固液相变,但 PLTES 系统中下层仍有相当一部分 PCM 未发生相变。通过调整储热器内部各层级 PCM 的无量纲填充比例,有望进一步优化储热器的整体性能。

3.2 填充比例的影响

基于熔点分布对储热器性能影响的研究结果,采用与结构 A 储热器各层级 θ_M 相同的储热器,开展不同无量纲填充比例 h^* 对梯级 PLTES 系统性能影响的研究。以储热器顶层无量纲填充比例 h_t^* 为 x 坐标,中间层无量纲填充比例 h_m^* 为 y 坐标,绘制储热器 η_{ma} 随 h_t^* 与 h_m^* 的变化情况,如图 11 所示。无量纲填充比例满足关系式 $h_t^* + h_m^* + h_b^* = 1$,其中, h_b^* 为储热器底层无量纲填充比例。图 11 中每个数据点

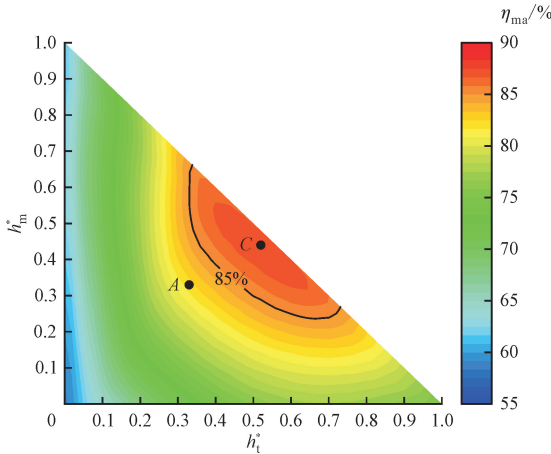


图 11 梯级 PLTES 系统中 η_{ma} 随 h_t^* 与 h_m^* 的变化

Fig. 11 Variations of η_{ma} for cascaded PLTES system with different h_t^* and h_m^*

代表不同填充比例的储热器,故将其命名为填充比例三角。填充比例三角的物理意义为:三角形 3 个顶点分别表示 θ_M 为 0.480、0.260、0.012 的 3 个单级储热器,三角形 3 条边表示不同填充比例的双级储热器,三角形内部区域表示不同填充比例的三级储热器。由图 11 可见,当 h_t^* 与在 0.34 至 0.72 范围内、 h_m^* 在 0.24 至 0.66 范围内变化时,梯级储热器 η_{ma} 可以达到 85% 以上。在结构 C 处,即 h_t^* 为 0.52、 h_m^* 为 0.44、 h_b^* 为 0.04 的条件下, η_{ma} 取最大值,达到 87.22%。

图 12 为结构 C 储放热结束时刻 PCM 温度分布图与液相分数图。由图可见,在储热结束时刻储热器内部斜温层 $h_C^* = 0.236$,放热结束时刻储热器内部斜温层 $h_D^* = 0.095$,储放热循环结束后储热器内 PCM 固液相变参与率达到了 97.9%。说明在结构 C 下储热器可以充分利用显热与潜热储存与释放热量,因此不再需要使用更多梯级的储热器。结构 C 为应用于铅铋堆核电系统事故工况下余热回收的最优 PLTES 结构。

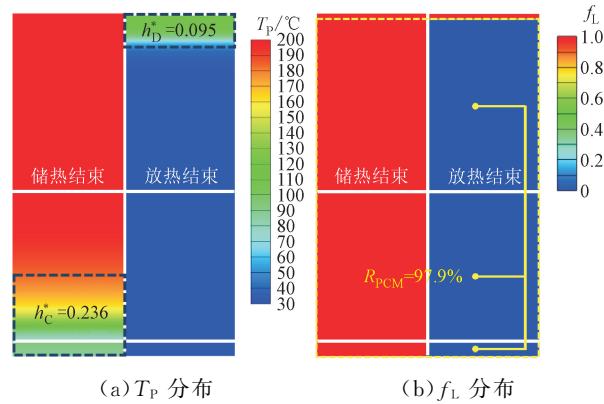


图 12 结构 C 梯级 PLTES 系统储放热结束时刻 T_P 和 f_L 分布

Fig. 12 Distribution of T_P and f_L for cascaded PLTES system with structure C at the final states of charging and discharging processes

3.3 不同 PLTES 系统性能对比

基于上述研究结果,分别选取容量利用率最高的 $\theta_M = 0.450$ 的单级 PLTES 结构(取名为结构 O)、经过熔点优化的梯级结构(结构 A)、经过进一步填充比优化的梯级结构(结构 C),进行 3 种不同优化方案的性能对比,结果如图 13 所示。由图可见,相比于单级最优的结构 O,经过梯级熔点优化与梯级填充比例优化后,梯级 PLTES 系统的实际储热量、实际放热量和容量利用率均得到了显著提升。值得注意的是,相比于结构 A,虽然结构 C 实际储热量更

少,但在放热过程中结构 C 斜温层更薄且 PCM 固液相变率更高。这一特征显著减少了放热结束后滞留在 PLTES 中的热量,滞留热量在总热量中的占比从 13%下降至 3%。因此,结构 C 的实际放热量更多,容量利用率也相应提高。总的来说,相比于单级最优结构 O,结构 C 的容量利用率由 75.75%提升到 87.22%,实际储热量与实际放热量分别可达到 1 037.23 kW·h 与 998.69 kW·h。

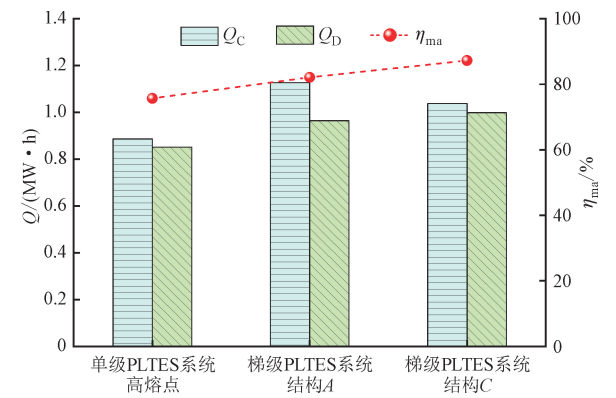


图 13 不同 PLTES 系统性能对比

Fig. 13 Performance comparison of different PLTES systems

4 结 论

本研究针对铅铋堆核电系统事故工况下的余热管理难题,提出了利用储热技术来进行余热管理的方法,基于此建立了出口阈值温度约束下的相变填充床储热装置数值模型,分析了 PCM 熔点、填充比例对单级与梯级储热系统热性能的影响规律,主要结论如下。

(1)在余热排放温度与用热品位要求下,单级 PLTES 系统在不同熔点条件下表现出显著的性能差异。当 θ_M 低于 $\theta_{D,th}$ 时,系统难以充分释放显热与潜热;而当 θ_M 高于 $\theta_{D,th}$ 时,系统则难以有效储存热量。整体来看,单级 PLTES 系统的容量利用率较低,最高仅为 75.75%。

(2)针对单级相变储热技术的不足,设计了梯级 PLTES 系统,并通过优化 PCM 熔点分布与填充比例,实现了储热性能的显著提升。当顶层 PCM 的 θ_M 高于 $\theta_{D,th}$ 时,系统能够在放热过程中长时间维持高温出口温度,显著延长有效放热时间,提升了储热器的储热量。通过进一步调整各级的填充比例,可使得 PCM 固液相变参与率最高提升至 97.9%,进一步提高了梯级 PLTES 系统的容量利用率。

(3)当顶层、中间层、底层 PCM 的无量纲熔点为

0.480、0.260、0.012,并设定填充比例为 0.52、0.44、0.04 时,梯级 PLTES 系统的容量利用率最高,为 87.22%。该装置的有效放热时间为 541 min,有效储热量与放热量分别为 1 037.23 kW·h 与 998.69 kW·h。

参考文献:

[1] WANG Bo, CHEN Bowen, WEN Jiming, et al. A mini review of research progress of nuclear physics and thermal hydraulic characteristics of lead-bismuth research reactor in China [J]. Frontiers in Energy Research, 2020, 8: 573199.

[2] 姜涛,李明佳,梁继越,等. 用于水下航行器的铅铋堆 S-CO₂ 循环发电系统热力学及动态特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11): 4138-4149.

JIANG Tao, LI Mingjia, LIANG Jiyue, et al. Thermodynamic and dynamic characteristics analysis of the S-CO₂ cycle power generation system integrated with lead-bismuth cooled reactor for underwater vehicle [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11): 4138-4149.

[3] 何雅玲. 热储能技术在能源革命中的重要作用 [J]. 科技导报, 2022, 40(4): 1-2.

HE Yaling. The important role of thermal energy storage technology in the energy revolution [J]. Science & Technology Review, 2022, 40(4): 1-2.

[4] NITHYANANDAM K, PITCHUMANI R. Cost and performance analysis of concentrating solar power systems with integrated latent thermal energy storage [J]. Energy, 2014, 64: 793-810.

[5] LI Mengjie, LI Mingjia, JIANG Rui, et al. Study on the dynamic characteristics of a concentrated solar power plant with the supercritical CO₂ Brayton cycle coupled with different thermal energy storage methods [J]. Energy, 2024, 288: 129628.

[6] NITHYANANDAM K, PITCHUMANI R. Optimization of an encapsulated phase change material thermal energy storage system [J]. Solar Energy, 2014, 107: 770-788.

[7] MA Zhao, YANG Weiwei, YUAN Fan, et al. Investigation on the thermal performance of a high-temperature latent heat storage system [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 122: 579-592.

[8] MA Zhao, LI Mingjia, YANG Weiwei, et al. General performance evaluation charts and effectiveness correlations for the design of thermocline heat storage system [J]. Chemical Engineering Science, 2018, 185: 105-115.

[9] KARTHIKEYAN S, VELRAJ R. Numerical investigation of packed bed storage unit filled with PCM en-

- capsulated spherical containers: a comparison between various mathematical models [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2012, 60: 153-160.
- [10] CASCETTA M, CAU G, PUDDU P, et al. Numerical investigation of a packed bed thermal energy storage system with different heat transfer fluids [J]. *Energy Procedia*, 2014, 45: 598-607.
- [11] ESENCE T, BRUCH A, MOLINA S, et al. A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems [J]. *Solar Energy*, 2017, 153: 628-654.
- [12] 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.
- ZHANG Yanyan, XIONG Yaxuan, CHEN Yahui, 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.
- [13] GUO Weimin, HE Zhaoyu, ZHANG Yuting, et al. Thermal performance of the packed bed thermal energy storage system with encapsulated phase change material [J]. *Renewable Energy*, 2022, 196: 1345-1356.
- [14] 张媛媛, 陈昆伦, 姚业成, 等. 相变填充床熔盐斜温层储热系统梯级储热特性 [J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(3): 787-794.
- ZHANG Yuanyuan, CHEN Kunlun, YAO Yecheng, et al. Cascade heat storage characteristics of multi-phase molten salt thermocline heat storage system [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(3): 787-794.
- [15] WU Ming, XU Chao, HE Yaling. Dynamic thermal performance analysis of a molten-salt packed-bed thermal energy storage system using PCM capsules [J]. *Applied Energy*, 2014, 121: 184-195.
- [16] WU Ming, XU Chao, HE Yaling. Cyclic behaviors of the molten-salt packed-bed thermal storage system filled with cascaded phase change material capsules [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 93: 1061-1073.
- [17] LI Mengjie, LI Mingjia, TONG Zixiang, et al. Optimization of the packed-bed thermal energy storage with cascaded PCM capsules under the constraint of outlet threshold temperature [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 186: 116473.
- [18] LI Mingjia, JIN Bo, MA Zhao, et al. 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 [J]. *Applied Energy*, 2018, 221: 1-15.
- [19] LI Mingjia, JIN Bo, YAN Junjie, et al. Numerical and experimental study on the performance of a new two-layered high-temperature packed-bed thermal energy storage system with changed-diameter macro-encapsulation capsule [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 142: 830-845.
- [20] LI Mengjie, LI Mingjia, XUE Xiaodai, et al. Optimization and design criterion of the shell-and-tube thermal energy storage with cascaded PCMs under the constraint of outlet threshold temperature [J]. *Renewable Energy*, 2022, 181: 1371-1385.
- [21] ZALBA B, MARIN J M, CABEZA L F, et al. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(3): 251-283.
- [22] ISMAIL K A R, JR R S. A parametric study on possible fixed bed models for pcm and sensible heat storage [J]. *Applied Thermal Engineering*, 1999, 19 (7): 757-788.
- [23] WAKAO N, KAGUEI S, FUNAZKRI T. Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid heat transfer coefficients in packed beds: correlation of Nusselt numbers [J]. *Chemical Engineering Science*, 1979, 34(3): 325-336.
- [24] HÄNCHEN M, BRÜCKNER S, STEINFELD A. High-temperature thermal storage using a packed bed of rocks-heat transfer analysis and experimental validation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31 (10): 1798-1806.
- [25] BEEK J. Design of packed catalytic reactors [M]// DREW T B, HOOPES J W, VERMEULEN T. *Advances in Chemical Engineering*. New York, USA: Academic Press, 1962: 203-271.
- [26] XU Can, LIU Ming, JIAO Shuai, et al. Experimental study and analytical modeling on the thermocline hot water storage tank with radial plate-type diffuser [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 186: 122478.

(编辑 武红江)