



储热系统温度均匀性多因素影响规律研究进展

邓佳瑶, 胡晓, 郭志远, 常亮, 王一诺, 户雯婷, 张宏杰, 徐桂芝
(中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 储热技术具有高本征安全性、大规模、低成本、长时的优势, 是破解可再生能源间歇性与波动性瓶颈, 构建新型电力系统的重要支撑。当前的储热系统面临着温度分布不均的难题, 影响系统运行与安全性, 阻碍大规模工程化应用。本文综述了温度均匀性的内涵与评价体系及温度均匀性的研究方法; 从储热材料热物性、系统结构设计、运行工况调控3个核心维度, 全面解析了热导率、孔隙参数、储罐、翅片结构、系统运行参数对温度均匀性的影响机制与规律。研究表明: 在材料热物性优化层面, 通过高导热第二相(泡沫金属、碳材料、纳米粒子等)构建高导热网络是提升温度均匀性的主流路径, 在此基础上开展孔隙率与孔隙密度的梯度寻优可实现最佳温度分布。在储罐结构与翅片结构优化层面, 在进行结构设计时减小由结构增加的热阻是关键。在运行参数层面, 入口温度升高会加剧温度不均; 流速存在阈值, 适当提升可改善均匀性; 底部注入有助于温度分布均匀。最后, 本文指出了当前研究在多参数耦合研究、动态变工况响应等方面存在的共性瓶颈, 并展望了未来在多参数协同优化、动态变工况大规模实验研究等方向的发展趋势, 可为储热系统的优化设计与工程化应用提供参考。

关键词: 储热技术; 温度均匀性; 热物性参数; 结构参数; 运行工况

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0444

中图分类号: TK 11⁺

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 09-3636-15

Research progress on the multi-factor influences on the temperature uniformity of the heat storage system

DENG Jiayao, HU Xiao, GUO Zhiyuan, CHANG Liang, WANG Yinuo, HU Wenting,
ZHANG Hongjie, XU Guizhi
(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Thermal energy storage (TES) offers inherent safety, large-scale scalability, low cost, and long-term economic benefits, making it a crucial technology for resolving renewable energy intermittency and fluctuations, thereby enabling the construction of new power systems. However, existing TES systems frequently suffer from nonuniform temperature distributions, which compromise system operation and safety and hinder large-scale applications. This review explores the connotation and evaluation systems of temperature uniformity, as well as the research methods for assessing it. The review leverages three core dimensions: material thermophysical properties, system structural design, and operation-condition regulation, to comprehensively analyze the influence mechanisms and laws of

收稿日期: 2026-05-26; 修改稿日期: 2026-06-22。

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目(5204BB250029-532-RC)。

第一作者: 邓佳瑶(1996—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为储能技术, E-mail: d2825900341@163.com; 通信作者: 徐桂芝, 教授级高级工程师, 研究方向为储能技术, E-mail: 1507395973@qq.com。

引用本文: 邓佳瑶, 胡晓, 郭志远, 等. 储热系统温度均匀性多因素影响规律研究进展[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(9): 3636-3650.

Citation: DENG Jiayao, HU Xiao, GUO Zhiyuan, et al. Research progress on the multi-factor influences on the temperature uniformity of the heat storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(9): 3636-3650.

thermal conductivity, pore parameters, storage tanks, fin structure, and system operation parameters on temperature uniformity. Research shows that constructing high-conductivity networks through second phases (foam metals, carbon materials, nanoparticles, etc.) at the thermophysical-property optimization level is the mainstream path to improving material temperature uniformity. On this basis, gradient optimization of porosity and porosity density results in an optimal temperature distribution. Within the storage tank structure and at the fin-structure-optimization level, minimizing the thermal resistance induced by the structure during the design phase is vital. At the operational level, increasing the inlet temperature exacerbates thermal nonuniformity. Flow velocity exhibits a threshold effect: appropriate increases can improve temperature uniformity, while bottom injection promotes uniform temperature distribution. Finally, this review identifies common bottlenecks in multiparameter coupling research and dynamic variable-condition responses in recent research and outlines future development trends in multiparameter cooptimization, large-scale dynamic-variable-condition experimental research, etc., to guide the design optimization and engineering applications of thermal storage systems.

Keywords: thermal storage technology; temperature uniformity; thermal physical parameters; structural parameters; operating conditions

科技的进步与社会的发展推动了全球能源需求的巨幅增长。传统能源由于储量受限、不可再生且在使用过程中会排放大量温室气体,已难以兼顾能源供给安全与生态环境保护的双重需求,其发展局限性日益凸显。2025年7月,中国单月用电量首次突破1万亿千瓦时大关,相当于日本全年的用电量总和,反映出我国未来能源需求仍保持刚性增长态势。而以光伏、风电为首的可再生能源具有显著的波动性、间歇性特点^[1-3],其大规模并网对电力系统的安全稳定运行带来了巨大的挑战,对电力这一“民生产品”的稳定供应非常不利。在此背景下,电力系统迫切需要发展能够保供应、维稳定的新型技术。

储热技术作为一种重要的能源存储形式,由于可实现能源的按需存储与释放,解决能源供需不平衡、时空错配等问题,在电网调峰等领域应用潜力巨大,是保证电网安全稳定运行、促进能源转型和绿色发展以及适应未来能源发展趋势的重要手段。然而,受导热、传热等限制,储/释热过程中易出现温度分布不均等现象,对系统整体的安全性不利。本文针对影响储热系统温度均匀性的多种因素进行研究进展梳理,总结了目前储热系统温度均匀性的评估手段与研究方法,系统分析了储热材料热物性参数、内部结构及运行工况对温度均匀性的影响。

1 储热系统温度均匀性的理论基础与研究方法

1.1 温度均匀性的内涵与评价体系

关于温度均匀性的定义,可以表示为储热系统在特定空间的温度分布的离散程度,它可以直观反映温度场分布的特征,对一些对温度均匀性要求较高的高安全储热系统来说,温度均匀性尤为重要。

根据系统所处的热状态,温度均匀性可以分为稳态均匀性与动态均匀性两大类,其中稳态温度均匀性指的是系统达到热平衡状态时,内部温度场在空间分布的一致性程度;动态温度均匀性则是指系统在储/释热进程中,温度场随时间变化过程中分布的一致性程度。同时在储热过程的不同阶段,温度均匀性的物理意义具有一定差异。以相变储热技术为例,在显热阶段,不发生相态转变,温度均匀性主要反映储热系统内部不同位置升温/降温速率的一致性;在相变阶段,系统内部固、液两相共存,温度均匀性主要反映相变进程的空间同步性。

目前常用的温度均匀性的定量化评价指标包括最大温差、温度均匀性系数、平均温度均匀性系数^[4-5],见表1。

此外,还发展了通过比较不同位置的温度曲线或相变时间差作为温度均匀性的侧面评估方法^[6-7]。

表 1 温度均匀性的定量化评价指标

评价指标	量化公式	评价规则
最大温差 $\Delta T_{\max}$	$\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_{\min}$ 式中, $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 分别为全场测温点的最高、最低温度	$\Delta T_{\max}$ 越小, 温度均匀性越好; $\Delta T_{\max} = 0$ 为理想完全均匀状态
温度均匀性系数 σ	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - T_{\text{ave}})^2}$ 代表某一时刻的温度均匀性; 式中, n 代表研究点的数量; T_i 表示第 i 个研究点的温度, T_{ave} 代表平均温度	σ 越小, 温度均匀性越好; σ 越大, 温度分布越不均匀
平均温度均匀性系数 $\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma} = \frac{\int_0^{t_f} \sigma dt}{t_f}$ 代表全时间维度的温度均匀性; 式中, t_f 为储热/放热总时长; σ 为温度均匀性系数	$\bar{\sigma}$ 越小, 温度均匀性越好; $\bar{\sigma}$ 越大, 温度分布越不均匀

比如新加坡的研究人员^[7]将样品侧面和中间位置的相变时间差用作评估温度均匀性的度量。如图 1 所示, 通过比较侧面位置温度-时间曲线 (side temperature) 与中间位置温度-时间曲线 (middle temperature) 的相变时间差, 可实现对温度均匀性的差异评估。导热性更好的样品能够将热量进行均匀分配, 从而使得整个样品内的相变时间更相似。因此, 侧面和中间位置较小的相变时间差代表温度分布更均匀。

1.2 温度均匀性研究方法

储热系统温度均匀性的研究方法可划分为数值模拟仿真研究与实验测量研究两大类, 二者形成“机制解析-实验验证-优化应用”的闭环研究范式。数值模拟的优势在于不受测点限制, 可以捕捉到实验无法观察到的现象, 实现全方位温度场-流场的同步解析, 低成本完成多参数、多工况的规律探究与机制分析。常用的模拟分析软件包括 ANSYS

Fluent 与 COMSOL Multiphysics, 其中前者更适用于流场主导的复杂结构, 后者则更适用于温度场主导、多物理场耦合的场景。实验测量方法是获取真实工况下温度分布数据、验证数值模型可靠性、支撑工程化应用的唯一手段。常用的实验测试方法包括热电偶测试、光纤测试与红外测试。仿真与实验测试方法二者相辅相成, 共同构成了温度均匀性研究的核心技术体系。研究温度均匀性的基本步骤如图 2 所示。

2 储热系统温度均匀性多因素影响研究

2.1 储热材料热物性参数对温度均匀性的影响

2.1.1 热导率

许多储热材料热导率低, 导致其温度分布不均匀, 储/释热速率低^[8], 这在一定程度上阻碍了储热技术的商业化发展。因此, 研究人员通常引入高热

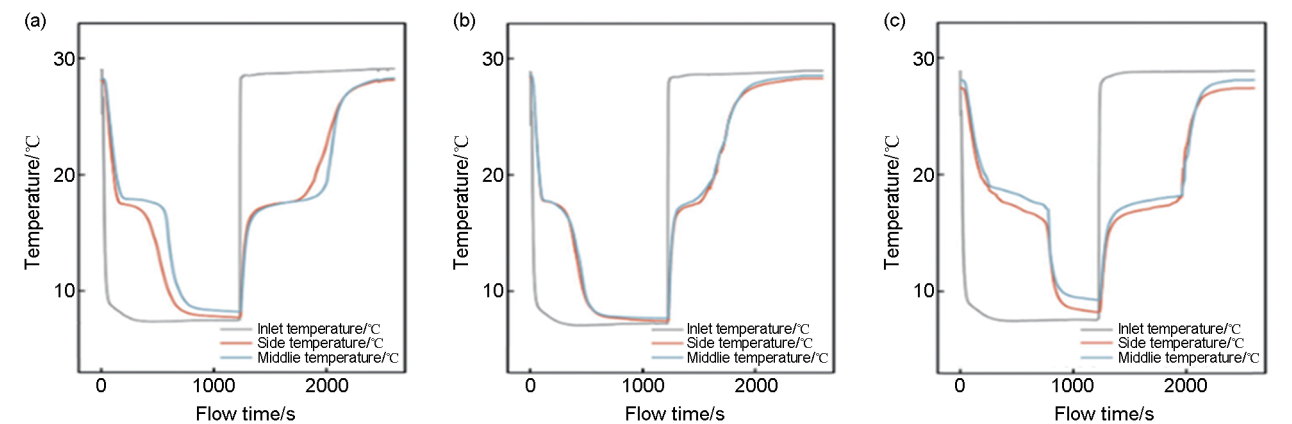


图 1 几种相变储热系统一个周期内的温度分布图: (a) 原始铜泡沫-相变储热复合材料; (b) 纳米铜泡沫-相变储热复合材料; (c) 纯相变储热材料^[7]

Fig. 1 Temperature distribution diagrams of several phase change thermal energy storage systems over one cycle: (a) Original copper foam-PCM (phase change materials); (b) Nano-copper foam-PCM; (c) Pure PCM^[7]

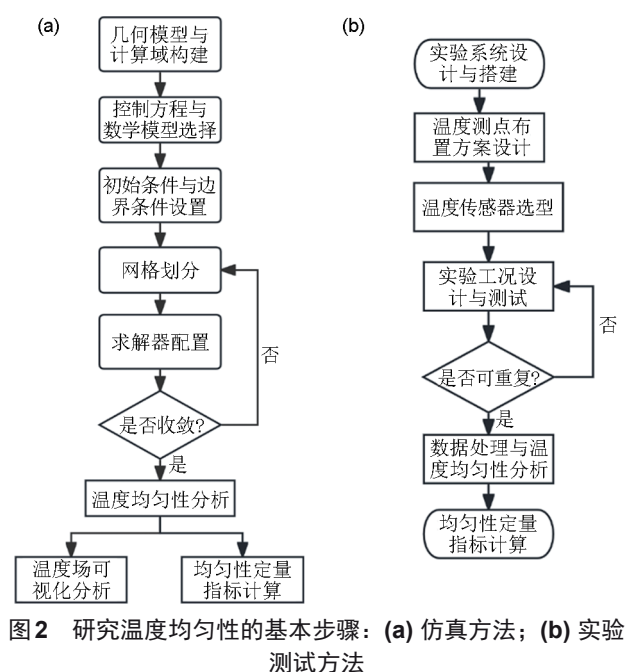


Fig. 2 Basic steps for studying temperature uniformity: (a) Simulation method; (b) Experimental testing method

导率添加剂（泡沫金属、碳材料、纳米粒子等）以提升基础材料的热导率。常见的几种高热导率添加剂如图3所示。

关于引入高热导率的材料来提升基础储热材料热导率的研究众多。提升复合相变材料热导率的主流技术路径在于构建连续的高导热通路。以泡沫金

属^[11-12]为代表的高导热第二相材料，凭借其较大的延伸表面积和高导热性的金属韧带^[9]，已成为实现该目标的关键材料体系之一。Khan等^[13]发现将相变储热材料（PCM）嵌入泡沫铝可以增强传热，减轻局部过热，使得储热系统的储/释热过程更为高效，原因是泡沫金属的存在提供了更为高效的“导电通路”，减少了“热滞现象”的发生。Waqar等^[6]比较了泡沫铜与泡沫镍-铁作为添加剂时，其对石蜡相变材料温度均匀性的影响，研究发现，泡沫金属的存在增强了复合材料内部的传热，从而提升了导热性能。泡沫铜-石蜡复合材料的实际热导率大于泡沫铁镍-石蜡复合材料，使其在 x 、 y 、 z 三个维度上展现出最优的温度均匀性。Wan等^[14]将泡沫铜用于石蜡相变储热材料的传热强化，结果表明添加泡沫铜后，石蜡的相变储热和放热时间分别缩短了16.67%和14.71%，储/释热过程中复合材料中心层与外层中心点的最大温差分别降低了91.5%和87.5%。Fok等^[7]通过在相变储热材料（PCMs）上合成 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 纳米线，得到了具有纳米化纹理的泡沫铜-PCMs复合材料，研究结果表明，纳米化纹理结构的泡沫铜-PCMs复合材料的热导率 $[1.65 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ 相较于纯PCMs $[0.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ 提升了7.3倍，仅需要一半的时间就能完成相变，这主要得益于 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 纳米线的均匀分布及材料较大的表面积。材料改进后，储热系统温度均匀性比纯PCMs高出

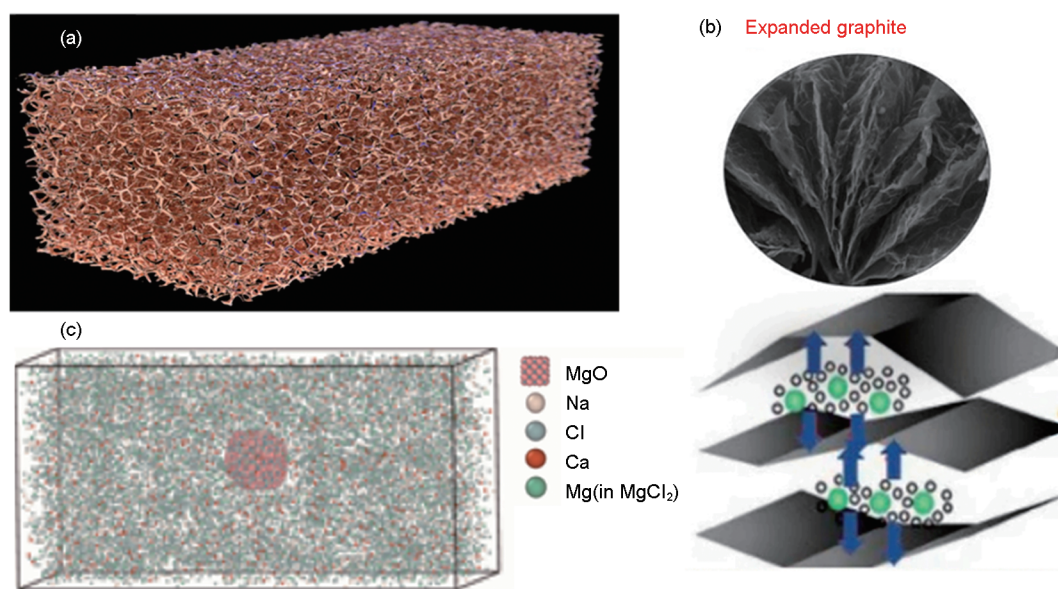


图3 常见的几种高热导率添加剂: (a) 泡沫铜^[9]; (b) 膨胀石墨^[9]; (c) MgO 纳米颗粒掺杂氯化物熔融盐^[10]

Fig. 3 Several common high thermal conductivity additives: (a) Foam copper^[9]; (b) Expanded graphite^[9]; (c) MgO nanoparticles doped with chloride molten salt^[10]

了96%。然而,引入泡沫金属后带来的也不都是正面影响,有学者^[9]发现相较于纯相变储热系统,引入泡沫铜后温度均匀性提升了79.37%,相变时间缩短了79.53%,但也带来了总储热量的降低

(4.6%),对热量的存储不利,因此在实际研究中需要平衡系统温度均匀性与储热量的关系。不同相变储热材料的结构示意图及不同材料的温度不均匀系数图如图4所示。

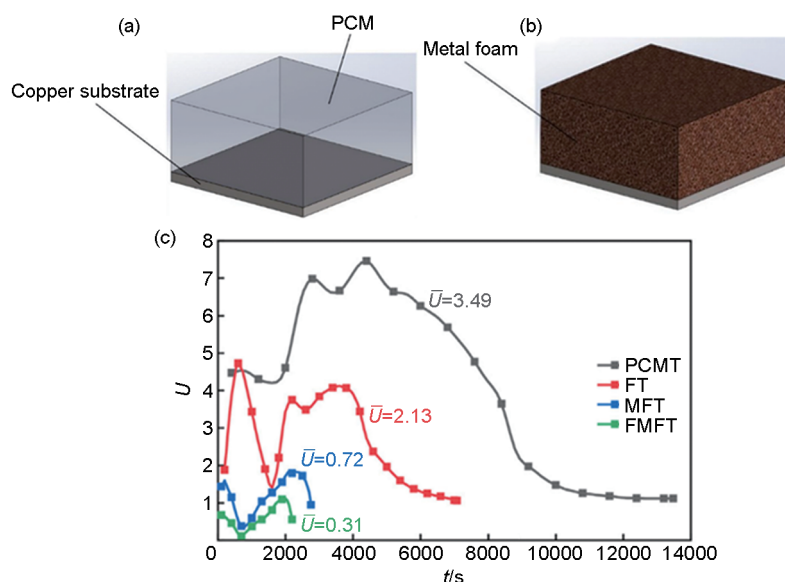


图4 (a) PCMT (纯石蜡相变储热材料) 和 (b) MFT (添加泡沫铜的相变储热材料) 的结构示意图; (c) 不同材料的温度不均匀系数图^[9]

Fig. 4 Schematic diagram of the structures of (a) PCMT and (b) MFT; (c) Graph of the temperature non-uniformity coefficient for different materials^[9]

除了泡沫金属,碳材料因兼具高本征热导率、结构可设计等优势,成为改善相变储热系统温度均匀性的另一类主流高热增强相,其中以石墨与石墨烯的研究最多。比如Kumar等^[15]在石蜡相变储热材料中引入压缩膨胀石墨(CEG),发现形成的复合材料(CPCM)的热导率得到明显提升[热导率由0.27 W/(m·K)提升至1.47 W/(m·K),提升了4.4倍],可以实现快速储热。更为关键的是,热导率的提升使得热能在复合材料全域内的传递更为均匀,有效消除了潜在热点的形成,实现了储热过程温度场的均匀化。Lu等^[16]研究了膨胀石墨(EG)粒径对潜热储热系统热性能的影响,对比了EG50(835 μm)、EG80(525 μm)、EG100(432 μm)三种粒径的影响,结果表明,EG80对热导率的提升效果最佳,其次是EG50和EG100;随着EG质量分数的增大,复合PCMs的热导率增大,与纯石蜡相比,添加质量分数5%的EG80后,热导率由0.355 W/(m·K)增大至1.492 W/(m·K),为温度均匀性的改善奠定了基础。Naresh等^[17]比较了不同种类[Al₂O₃、Cu、CuO、石墨烯纳米片(GnP)]及浓度

(2%、5%、8%、10%)的纳米颗粒对潜热储热系统熔融行为和热行为的影响,结果表明,几种纳米颗粒中,GnP由于具有更高的热导率[>30000 W/(m·K)]及导热网络,其熔化速率及热均匀性均明显优于其他添加剂(GnP>Cu>CuO>Al₂O₃);10%GnP添加获得了最有效的增强效果,液相率高达98%且在PCM全域实现了几乎均匀的温度分布。Nie等^[18]通过数值模拟进一步研究了GnP颗粒浓度分布对管壳式储热装置温度均匀性的影响(图5),发现底部更高的颗粒浓度可针对性地强化底部导热能力,弥补自然对流随高度衰减导致的温度不均。与均匀分布工况相比,底部高浓度分布工况(Case 4)熔融均匀性提升了25.8%,各分区熔化同步性好,内部温度分布更均匀。此外,他们的研究表明温度均匀性最佳的浓度分布为上(3.5%)—中(2%)—下(6.5%),熔融均匀性较Case 1提升了94%。然而,碳基材料的增强效果存在临界添加阈值,添加量超过临界值后可能引起团聚,进而破坏热网络,从而导致温度均匀性恶化,比如Yang^[19]的研究将石墨烯作为添加材料,比较了不同石墨烯含量

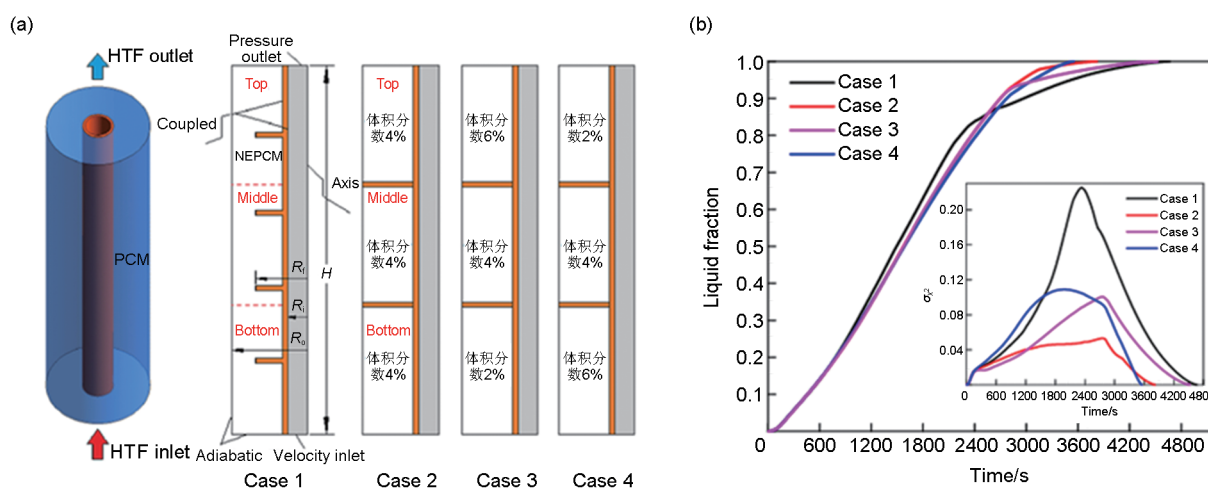


图5 (a) 不同纳米颗粒与翅片分布情况图; (b) 区域的液相率与熔融均匀性指数^[18]

Fig. 5 (a) Different nanoparticle and fin distribution diagrams; (b) Liquid phase ratio and melting uniformity index of the region^[18]

对复合相变材料蓄热性能的影响。仿真与实验结果表明, 5.5%的石墨烯添加形成10~20 μm 的团聚块(SEM证实), 破坏了热网络; 而2.5%的添加创造了均匀的三维导热路径, 在不降低潜热的前提下, 将热导率提升至2.3 W/(m·K), 温度均匀性显示最大温差由18.3 $^{\circ}\text{C}$ (纯石蜡相变材料)降低至11.1 $^{\circ}\text{C}$ (实验值)与10.5 $^{\circ}\text{C}$ (仿真值)。其他被引入相变材料中以提升温度均匀性的碳材料还包括碳纳米管^[20-23]、碳纤维^[24-25]等。

近年来, 一些金属氧化物纳米粒子, 例如 Al_2O_3 、 CuO 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 SiO_2 等, 由于其小尺寸及边缘位点的高密度特性, 有助于强化传热过程, 提升温度均匀性。Tan等^[26]在月桂酸/硬脂酸复合相变材料中加入纳米 CuO 与纳米 SiO_2 作为导热增强材料, 结果表明0.2%纳米 CuO 复合相变材料的性能最好, 热导率提升了30%。Neeraj等^[27]研究了二氧化钛(TiO_2)、氧化锌(ZnO)、氧化铁(Fe_2O_3)和二氧化硅(SiO_2)等多种金属氧化物(MO_x)纳米颗粒对六水合硝酸镁 $[\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ 相变材料热物理性能的影响, 以适配不同储热应用场景。该研究首先对比了0.2%~1%质量分数范围内纳米颗粒的影响规律, 发现当 TiO_2 质量分数为0.5%时, 复合相变材料的稳定性最佳。之后便制备了 TiO_2 、 ZnO 、 Fe_2O_3 和 SiO_2 质量分数均为0.5%的相变纳米复合材料, FT-IR等表征实验表明纳米粒子与相变材料间仅存在物理作用, 无化学反应发生, 热导率测试结果显示, 复合材料的热导率分别

提升了147.5%、62.5%、55%和45%。同时, 纳米粒子的添加使相变材料的相变温度略有降低, 其中, TiO_2 纳米复合材料表现出最佳的传热特性和相变时间性能, 与纯相变材料相比, 其充/放热速率分别提升了33%和77.5%。Raj等^[28]提出了一种双纳米增强策略, 通过在糖醇类相变材料中引入具有高热导率的双纳米粒子 $[\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2\text{-SWCNT}$ (单壁碳纳米管)], 研究不同纳米粒子种类及不同体积分对相变储热技术的影响, 结果表明当 $\text{SiO}_2\text{-SWCNT}$ 体积分数为6%时显著提升了储热系统的固化速率与温度均匀性。

2.1.2 孔隙率和孔隙密度

采用高导热多孔骨架构建复合相变体系是目前强化相变传热的主流技术路径之一。孔隙率和孔隙密度(PPI)作为多孔强化储热系统的核心结构参数, 直接决定了相变材料填充容量与体系体积储热密度, 同时显著调控等效热导率与自然对流强度, 进而影响系统充/放热速率与储热体内部温度分布均匀性, 这是储热装置热性能优化的关键调控指标。

孔隙率对温度均匀性的调控, 本质是平衡体系储热密度、导热强化能力与自然对流发展空间三者间的协同关系。对于均匀孔隙结构而言, 孔隙率过高会导致骨架导热通道占比不足, 体系等效热导率偏低, 易出现局部传热滞后、温度梯度过大的问题; 孔隙率过低则会压缩液相区流动空间, 抑制自然对流的均温作用, 同时牺牲系统储热密度, 同样会加剧温度分布非均匀性。Guo等^[29]针对不同压缩

比（对应不同孔隙率）的泡沫铜-石蜡复合相变材料垂直壳管式潜热储热单元，通过数值模拟与可视化实验相结合的方法，探究了孔隙率对单元熔化储热特性与温度均匀性的影响规律。结果表明，与未压缩的均匀结构（孔隙率为0.94）相比，适度压缩的低孔隙率结构可使完整熔化时间缩短13.9%（压缩比为0.1），同时获得最佳温度均匀性；而过度降低孔隙率则会使熔化时间最长延长至129.4%（压缩比为0.5），并引发严重的温度分布不均。其研究指出，孔隙率的调控核心在于平衡导热强化与自然对流发展，二者协同可同步优化储热效率与温度均匀性。关于孔隙率^[30-32]的优化进行了多项研究，比如：Huang等^[33]对比了不同孔隙率梯度的水平相变储热结构的储热特性，发现采用正孔隙率梯度（0.97—0.98—0.99）的金属泡沫结构与采用均匀（0.98）或负孔隙率梯度（0.99—0.98—0.97）的结构相比，其热传递效率和均匀性得到了显著提高。Wei等^[34]比较了轴向和径向策略下复合PCM的热传递过程，发现较大的轴向孔隙率梯度分布获得了更好的平均温度均匀性[0.441@（0.96—0.90）]，与均匀分布相比，温度均匀性提升了26.9%，而径向则有助于提高熔化性能。还有学者^[35]开展了二维孔隙度梯度优化，不再将孔隙度的优化仅局限在单一的轴向或径向上，得到了最佳的二维梯度（0.96—0.93—0.90/0.98—0.95—0.92），有效提升了材料的传热与热能存储能力。

除了孔隙率，众多研究表明，适度提升孔隙密度可以显著优化温度均匀性，比如金虹庆^[36]系统分析了石蜡熔化过程中泡沫金属孔隙密度对传热行为的调控规律，研究发现，泡沫金属孔隙密度越小，石蜡熔化阶段的温度梯度、局部温差峰值越高，相变界面越窄，热不平衡现象越显著；而增大孔隙密度可有效改善复合相变材料的温度均匀性。Li等^[37]开发了具有不同PPI数（5、20、40）的硬脂酸/泡沫铜复合相变储热材料，发现当PPI数为40时，储热系统的内部热传递均匀性和热扩散能力最优。Gao等^[38]对填充有不同梯度孔隙参数（孔隙率均为0.98，PPI不同）的泡沫铜-石蜡复合（CPCM）相变垂直热能存储（TES）单元进行了研究，通过实验和数值模型研究了液相分数、固/液界面、温度场和速度场的变化，并评估了放热特性，包括热传递分布和放热量（图6）。结果表明，与均匀结构相

比，采用正、负径向梯度孔隙密度排列的固化时间均缩短了14.3%，研究人员推断是孔隙密度不均增强了不同梯度层之间的自然对流，而采用正向还是负向梯度对自然对流的优化效应差异不大。同时，由于孔隙密度的变化，优化后结构的温度均匀性提高了4.0%，这是由于之后的热传导促进了热能释放，复合相变材料内部的温差逐渐减小，温度均匀性逐渐提升。然而也有研究^[39-40]表明孔隙密度的升高会引起对自然对流的抑制，进而影响相变传热过程，可能会对温度均匀性不利，因此需要对孔隙密度进行优选。同样地，牛东茵^[41]的研究发现当孔隙率不变时，孔隙密度的提升对于相变储热温度均匀性的提升效果较小，这是由于泡沫金属复合相变材料的相变传热以导热为主、自然对流为辅，在固定孔隙率下，孔隙密度增大会同步产生“导热强化”与“对流抑制”两种反向效应：前者源于骨架-PCM界面换热面积的增大，后者来自孔隙孔径减小引起的流动渗透率下降。二者耦合作用下，孔隙密度提升对相变传热的强化效果并不显著。

综上所述，可以看出目前关于热物性参数对储热温度均匀性的影响研究主要集中在热导率、孔隙率及孔隙参数三大方面，表2为对部分研究结果进行的总结。

2.2 储热系统内部结构对温度均匀性的影响

关于储热系统内部结构的优化，本质上是一种减小热阻、提升换热速率的传热增强技术^[42]，当前国内外学者的研究重心主要集中在储罐的结构优化与添加翅片两大方面。

研究表明，储罐结构的改变主要是通过影响PCM中的热传递（传导与对流）及改变内部PCM的分布进而对储热系统产生影响^[43]，比如说储罐的外形（圆柱、圆锥、长方体、梯形、漏斗形等）与储罐形状参数（尺寸、纵横比等）等均会对储/释热过程与温度均匀性产生一定的影响。Vyshak等^[44]对矩形、圆柱形和壳管式三种封装形式的PCM的总熔化时间进行了比较研究。在相同体积的PCM外壳和传热表面下，壳管式结构被认为是储存同等热量所需时间最短的最佳结构。Seddegh^[45]对比了圆柱形和圆锥形储罐的储/释热过程，发现使用圆锥形储罐可以更好地利用自然对流，使得相变材料的熔化速度提升了12%左右，体现出更好的储热温度均匀性，而两种结构的释热性能差异较小。其

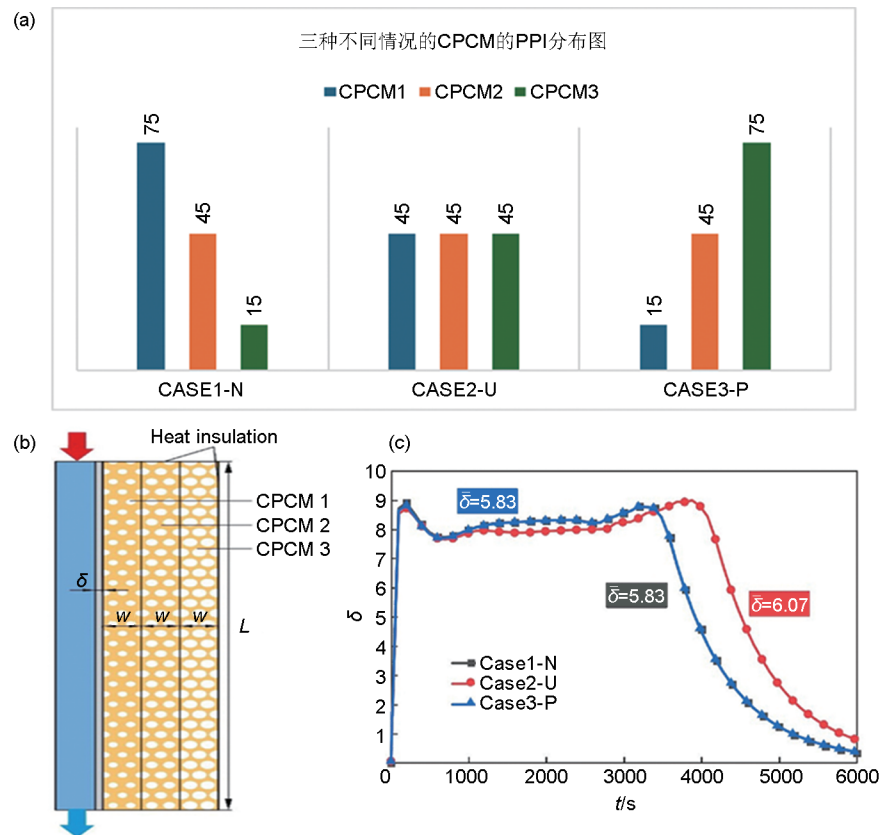


图6 (a) 三种不同情况的CPCM分布图; (b) 二维轴对称模型示意图; (c) 温度均匀性指数随时间的变化图^[38]

Fig. 6 (a) Three different distribution maps of CPCM; (b) schematic diagram of two-dimensional axisymmetric model; (c) graph showing the variation of temperature uniformity index over time^[38]

表2 影响储热系统温度均匀性的热物性参数

Table 2 Thermal physical parameters affecting the temperature uniformity of the heat storage system

因素	原始材料	添加材料	热导率/[W/(m·K)]	温度均匀性	总结
热导率	石蜡 ^[5]	泡沫铜	↑	↑79.37%	较大的延伸表面积和高导热性的金属韧带，增强了复合材料内部的传热，提升了导热性能，进而提升了温度均匀性
	RT-18石蜡 ^[7]	纳米化纹理泡沫铜	7.3倍 (0.2→1.65)	↑96%	高热导率、易于成型、成本效益高、密度低，热导率的改进使得热能在PCM域中分布更均匀，从而形成相对均匀的温度场，消除了潜在的热点
	石蜡 ^[16]	EG80 (膨胀石墨)	3.1倍 (0.36→1.49)	—	高热导率及优异的导热网络，减少了热梯度，使得潜热吸收增强，提升了热均匀性
	石蜡 ^[15]	压缩膨胀石墨	4.4倍 (0.27→1.47)	↑	导热性能优异、化学稳定性强、与相变基体相容性可控；耐高温、不易与有机基体发生化学反应；纳米尺度效应（表面效应、量子尺寸效应）可改变相变材料的结晶行为，调控相变温度与潜热
	正二十烷 ^[17]	GnP (石墨烯纳米片)	↑	↑	适当降低孔隙率，可以平衡导热强化与自然对流的发展，提升温度均匀性；过低则会打破两种传热机制的平衡，引起温度场的严重非均匀分布
孔隙率	石蜡52-54 ^[29]	泡沫铜	—	压缩比 (0.05→0.1): ↑; 压缩比 (0.1→0.5): ↓	孔隙密度不均增强了热传导，促进了热能释放，复合相变材料内部的温差逐渐减小，温度均匀性逐渐提升
孔隙密度	石蜡 ^[41]	泡沫铜	—	非均匀孔隙密度排列下的温度均匀性较均匀结构提升了4%	

他学者同样发现锥形外部结构的设计可以实现更好的温度场均匀性^[46-47]。Chen等^[48]进一步研究了锥形壳体的壳体角度(0°到3.5°)对于垂直管壳式相变储热系统熔融均匀性的影响,发现在熔化初期,热传递以传导为主,熔融速度较慢,随着时间的推移,自然对流发生,不同壳体角度的熔化速率差异更为明显,在壳体角度为1°时实现了熔融时间最短以及最佳的熔融均匀性,研究人员将其归因为锥形壳体设计实现了更好的自然对流利用。Li等^[49]采用机器学习的方法比较了10种具有不同上、下半径比例(R_1/R_2)的梯形罐体的相变储热性能,从均匀性的角度评估发现上、下半径比值大于1的情况的温度均匀性更好,表明适当增加上部PCM量有助于改善温度均匀性,当上、下半径比值为2时,温度均匀性最好,较上下半径比为1的结构温度均匀性提升了12.92%。Abddaim等^[50]研究了填充床系统中储罐的高径比(高度与直径的比)的影响,结果表明为了实现最佳的热量分布且热损失最小,罐体高度最好大于直径的3倍。他们还研究了不同填充材料尺寸的影响,发现填充材料直径足够小能保证更好的热扩散,达到更均匀的温度分布。此外,还有学者将研究扩展到内部换热结构中,比如Kurşun等^[51]探索了多管储热系统中换热管的数量(1、2、3、4)和管的几何形状(圆形、方形、三角形)对储/释热能力的影响,发现4管配置在多管储能中储热时间最短,热量在相变材料容器内分布得更加均匀,其中三角形管具有最大的热传导面积,热能传输速度最快。

增加翅片是一种通过增加传热面积来提高热传递效率,进而优化温度均匀性的低成本储热系统结构优化措施。常见的翅片类型如图7所示。传统的单一型翅片结构包括环形、纵形(直型)、Y形等,由此还衍生出了分形(树形)、雪花形等多种形状,以及针对翅片的尺寸、数量、布置方式等参数展开的优化。Pu等^[52]对垂直相变储热系统中不同翅片结构的热行为及储热均匀性进行了对比,发现引入环形翅片后平均传热系数增大、熔化时间缩短、熔融均匀性得到明显提升,特别是采用等差布置的环形翅片液体分数均方根最低,熔融均匀性最好。Li等^[53]研究了分形翅片对相变储热装置的强化作用,结果表明,分形翅片较无翅片和矩形翅片,传热性能更优,温度均匀性分别提升了131.5%和46.2%。

他们还对翅片数量进行了寻优,发现6片翅片可获得最短熔化时间与最佳温度均匀性,验证了其高效传热与快速均温特性。Zhang等^[54]将雪花形翅片用于相变储热装置中,发现与相同体积的纵形翅片相比,雪花形翅片能够显著提升储热单元的传热速率与温度均匀性,完全熔化/凝固时间可分别缩短26.87%和32.01%。

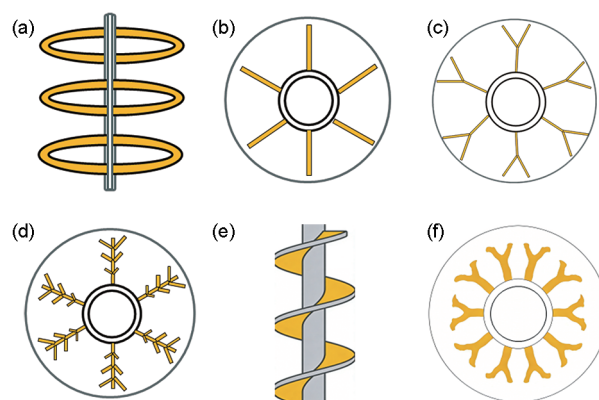


图7 常见的翅片类型: (a) 环形; (b) 纵形; (c) Y形; (d) 雪花形; (e) 螺旋形; (f) 拓扑形

Fig. 7 Common fin types: (a) Circular; (b) Longitudinal; (c) Y-shaped; (d) Snowflake-shaped; (e) Spiral-shaped; (f) Topological shape

组合型翅片是在单一型翅片结构的基础上进行结构组合,比如Song等^[55]开展仿真建模分析,构建了一种新型的具有偏心树状翅片结构的管壳式蓄热系统,研究表明,与传统的非偏心直形翅片相比,采用偏心布置同时增加树状翅片结构后,能够加速远离加热面位置的相变材料的熔化,避免局部过冷现象的发生,显著缩短了相变蓄热材料的平均熔化时间,温度均匀性提升了47.75%。Luo等^[4]研究了垂直潜热存储装置的热传递性能,比较环形翅片、雪花形翅片以及4种环形-雪花形组合型翅片在储/释热过程中的三维瞬态热传递行为,结果显示,在储热过程中,Case D(8个环形翅片+2个雪花形翅片)的温度分布最为均匀,温度均匀性系数最小(1.66);而在释热过程中,Case E的温度均匀性更好(1.85)。这可能是由于环形+雪花形翅片的组合形式,有效协调了传导与对流,实现了更均匀的轴向温度分布。

近年来,还发展出了更为新颖的结构,比如螺旋翅片结构由于引入了更强的涡度^[56]从而增强了自然对流,达到了更好的传热增强效果。Essa等^[57]比

较了相变储热系统中采用螺旋翅片和环形翅片的热性能差异,结果表明,螺旋翅片系统的管轴沿线温度比环形翅片系统更均匀,最大温差分别为4℃和12℃。Zhang等^[58]研究了不同螺旋螺距和翅片数量参数下的热存储性能差异,结果表明,缩短螺旋螺距和增加翅片数量可以加快熔化速率,有助于相变材料温度场的均匀分布,但这两个参数的选择需要考虑热存储性能和整体工艺处理难度。拓扑优化则更为先进。它是一种基于给定的载荷条件、约束条件和评估标准,在给定的设计体积内优化材料分布的数学方法。这种方法常常能获得既定目标下的最优结果^[59]。比如 Song 等^[60]就在相变储热系统中引

入翅片拓扑结构优化,得到了类似叶片和雪花结构的自然结构。相较于传统的翅片结构,该优化结构的热循环速率提高了2.08倍,同时相变材料在熔化和凝固过程中的温度分布不均匀性分别降低了65.32%和85.26%。Zhang等^[61]比较了无翅片、矩形翅片、环形翅片与拓扑优化翅片4种不同储热系统结构的传热能力,结果表明,经拓扑优化后的翅片结构在换热性能上明显优于其他结构,其多分支和径向延伸结构提供了更优的传热路径,提高了反应器径向温度均匀性。

表3总结了针对储罐结构与翅片优化的原理及优缺点。

表3 针对储热系统温度均匀性提升的内部结构参数（储罐结构及翅片）优化的原理及优缺点				
Table 3 Principles and advantages and disadvantages of optimizing internal structural parameters (storage tank configuration and fins) for improving temperature uniformity in thermal energy storage systems				
方法	原理	优点	缺点	
储罐结构	储罐外形优化	从根源上重构储罐内部的热流场、温度变化界面推进形态,以及换热面与储热介质的接触布局,从全局削弱温度分层、消除流动死区	均温潜力大,储释热全周期适配强 ^[62]	均温可控性差,非标外形加工复杂,工程落地难 ^[63-64]
	储罐形状参数优化	几何外形固定下,核心参数的调节用于调控内部热传递的强度与路径;优化温度变化界面的推进速率、缓解温度分层	优化门槛低、均温可控;易工程落地 ^[65-66]	固有死区难消,均温提升有限,难全局均温 ^[49]
	形状优化	通过优化翅片的几何拓扑结构(如分形、树形、环形、螺旋形等),拓展均衡的换热面布局,实现全域均温	优化自由度高,改造成本低 ^[67]	复杂结构加工难,导致储热密度下降 ^[58, 67]
翅片	固定翅片基础形状,通过调整翅片的长度、厚度、间距、布置数量等参数,调控换热面积分布与热阻大小,均衡全域热流,缩小全域温差	优化逻辑简单、易升级改造 ^[68]	构型受限,难以突破均温上限,参数耦合下超限会恶化均温 ^[4]	

2.3 运行工况对储热系统温度均匀性的影响

与2.1节、2.2节介绍的两种形式不同,运行工况参数因无需改变系统的硬件结构,调节相对灵活,成本更为低廉,更适合工程应用。影响储热系统温度均匀性的运行工况参数主要包括工质入口温度、流速、进出口方向以及压力等。

入口温度是决定储热系统传热驱动力的核心热力学边界,其与储热材料相变温度的差值直接影响储热速率与温度场分布,是影响储热系统性能的重要因素。现有研究^[69-71]普遍达成的共识为,改变入口温度提高了传热驱动力,有利于提升温度响应速率,缩短储/释热时间。而关于入口温度对温度均匀性的影响,多数研究^[71-74]认为,入口温度提高,产生的温差增大,斜温层厚度的持续增加,热分层加剧,最终导致温度均匀性恶化。比如金波等^[74]的研究表明,当入口温度从425℃升高至465℃时,储热速率提升了60.5%,但也带来了沿流动方向的空气温度下降程度增大,不同区域的相变同步性下

降,温度不均匀程度加剧。

流速参数通过改变管内流态、对流换热系数与储热体内的流场分布,影响温度均匀性,并且其影响存在显著的阈值效应。在一定范围内适当提升流速,有助于强化系统的对流换热,使得沿换热流体流动方向的换热温差更均衡,改善温度均匀性。比如 Du 等^[75]将流速从5 L/min提升至10 L/min后,在相同工作模式下,相变储热系统的温度均匀性最大提升了18.2%。而当流速超过一定值后,流速提升对温度均匀性的优化作用呈现显著的边际递减效应,甚至导致温度均匀性恶化,比如 Li 等^[76]选取了3 m/s、4 m/s、5 m/s、6 m/s的一组流速数据,比较了储热系统的热性能,结果表明当流速超过5 m/s后,高入口流速带来了局部温差的扩大,增加了热阻,阻碍了有效吸热,温度均匀性变差,降低了整体热存储效率。

入口方向则是通过改变储热系统内的流场分布、温度分层与流体运动间的关系,影响系统内部

的温度场。不同结构对于流入方向的影响程度不同。对于水平结构,只能选择水平注入,其热响应速度更快,但存在明显的上下部温度分层;对于垂直结构,可选择顶部与底部注入,大量实验与数值模拟研究表明^[73, 77-78],受重力与浮力影响,流体底部注入可削弱自然对流温度分层,显著提升PCM的温度均匀性,其核心原因是浮升力与强制流动形成协同效应,减薄了热边界层。比如有研究^[73]表明,对于潜热储热系统,在储热过程中,与顶部注入相比,采用底部注入,虽然相变材料的平均温度稍低,但其熔化时间和温度均匀性得到了明显改善,温度均匀性提升了48.65%。

系统工作压力对储热温度均匀性的影响与储热工质类型、工作温区强相关,在气相/超临界流体储热系统中为核心影响参数,在常规液相-相变储热系统中影响较弱。如图8所示,有研究人员^[50]研究了以空气为传热流体的入口压力对于储热系统温度分布的影响,发现提高入口压力增加了传热流体的体积热容量,同时还有助于减少对环境的热量损失,使得储热系统轴向温度分布更均匀,提升了温度均匀性,研究人员推断这可能是因为高入口压力显著增强了固体/流体间的对流热交换能力。

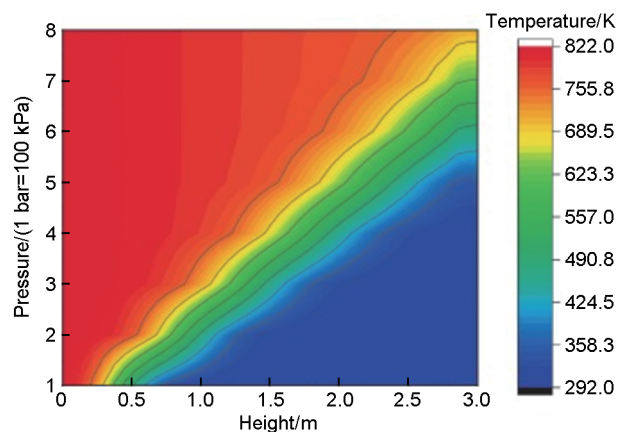


图8 填充床储热系统随入口压力变化的温度剖面图^[50]

Fig. 8 Temperature profile diagram of the packed bed thermal storage system with respect to the inlet pressure variation^[50]

2.4 因素耦合对温度均匀性的影响

前述章节梳理了单一因素对储热系统温度均匀性的影响,但在实际运行过程中,多因素间可能存在一定的耦合效应,因此研究典型耦合下多因素对温度均匀性的联合影响就显得格外重要,但当前针

对多因素耦合效应的研究较少。张金亚等^[79]研究了等金属质量的不同PPI(20、30)的泡沫金属与翅片对相变储热系统的影响,发现储/释热过程中热物性参数与结构参数的影响不同:储热过程中泡沫金属的存在会抑制对流换热,采用翅片结构更有助于提升储热性能;而释热过程中热传导占据主导地位,泡沫金属的凝固性能更优。这种差异性也表明针对储热或释热单一过程优化的材料热物性-结构组合,可能无法同时保证全周期的温度均匀性,需通过耦合设计实现双向匹配。Ren等^[80]通过空间耦合高孔隙度泡沫铜与拓扑优化翅片增强相变储热性能,系统研究了泡沫铜孔隙率、拓扑翅片体积系数、入口流量和温度对热存储容量、熔点时间和系统压降的影响,并进行了基于响应面分析的多目标优化(图9)。研究发现各参数之间存在复杂的权衡,泡沫铜孔隙率与翅片体积系数之间存在二元耦合机制,它们对热传导有协同增强效应,但在有限空间内对PCM体积存在权衡限制,整体性能需通过参数匹配进行优化,全局最优参数显示入口流量为1.30 m/s、入口温度为373 K、泡沫铜孔隙率为0.877、拓扑翅片体积系数为0.108时,实现了储热性能与流阻之间的最佳平衡,这得益于拓扑翅片的方向导向和泡沫铜均匀扩散的协同效应。

3 结论与展望

本综述围绕储热系统温度均匀性开展研究梳理,首先总结了温度均匀性的内涵、当前采用的主流评价体系以及研究温度均匀性的理论与实验研究方法,可为后续学者研究温度均匀性提供基础理论参考;之后从热物性参数、结构、运行参数3大维度重点梳理了其中影响温度均匀性的因素。其中材料热物性是温度均匀性的基础决定因素,当前针对热物性参数层面的研究主要涵盖热导率与孔隙参数:热导率的研究重点在于通过引入高导热第二相解决材料本征热导率偏低的难题,可选材料包括泡沫金属、膨胀石墨、金属纳米粒子;孔隙参数则是通过调节热传导与自然对流的关系,影响温度均匀性。系统结构参数是温度均匀性的核心调控手段,通过调控储罐与翅片的形状与结构参数,优化内部热流场分布与传热路径,可实现对温度场的优化。运行参数调节是更适合工程应用的灵活调控方式,各参数的协同调控可实现较优的温度均匀性。

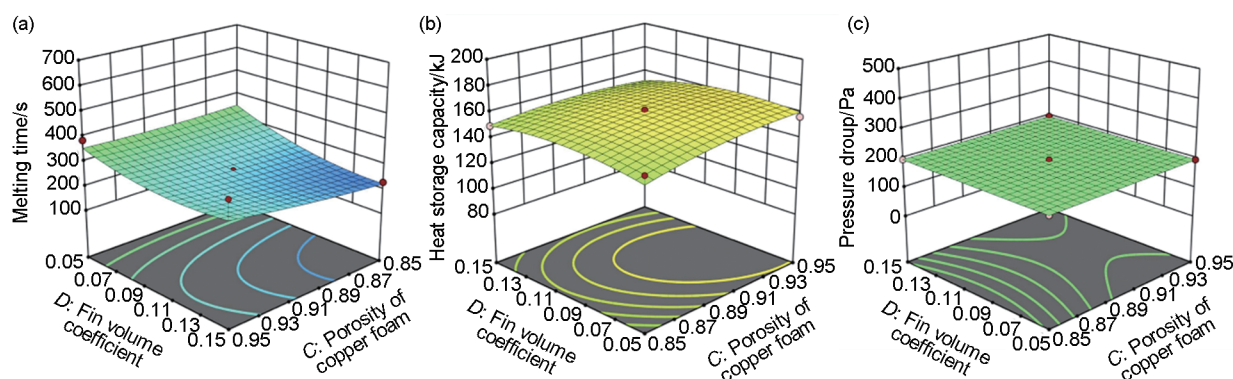


图9 针对翅片体积分数与泡沫铜孔隙度的相互作用的响应面分析^[80]: (a) 熔化时间; (b) 储热容量; (c) 压降
Fig. 9 Response surface analysis of the interaction between fin volume fraction and foam copper porosity^[80]:
(a) Melting time; (b) Heat storage capacity; (c) Pressure drop

然而, 当前研究仍存在一些瓶颈: 一是针对单参数的研究较为成熟, 但对于多参数的耦合研究不足; 二是目前的研究主要基于仿真与小型实验单元开展, 对于大型实验乃至工程化的储热系统的研究匮乏; 三是现有研究多基于恒定温度等稳态工况开展, 而储热系统实际运行时面临可再生能源波动的动态变工况, 相关研究滞后。

因此, 针对上述研究瓶颈与实际发展需要, 未来关于储热系统温度均匀性的研究可能朝以下方向开展。在研究方向层面, 亟须开展针对材料-结构-运行多参数耦合全局优化研究, 形成多参数协同调控策略, 具体可通过正交实验设计、响应面设计、田口设计等方法开展多参数耦合设计、识别核心参数, 开展基于温度均匀性与储热密度等参数的多目标优化, 实现协同调控; 在研究尺度层面, 需要在仿真建模的基础上开展更高层级的稳态工况及动态变工况实验研究, 对理论研究结果进行验证, 研究中除了动态温度均匀性指标, 变工况下可能还需引入阈值型温度均匀性指标, 如温度均匀性超限率、温度均匀性恢复时间等, 重点评估是否符合工程安全运行要求, 促进储热技术的未来工程化进展。

储热技术是我国实现能源转型与“双碳”目标的核心支撑技术, 而温度均匀性则是制约储热技术性能提升与工程规模化应用的关键。未来通过材料创新、结构优化及运行策略调控的协同突破, 必将提升储热系统的温度均匀性及安全性, 为我国“双碳”目标的实现提供坚实的技术支撑。

参考文献

[1] HE P, LIU Z M, LI C S, et al. Probabilistic small-signal stability

analysis of a wind-solar-thermal-storage hybrid energy system[J]. *Journal of Energy Engineering*, 2026, 152(4): 04026027. DOI:10.1061/jleed9.eyeng-6535.

[2] WANG X, CUI Z Y, YANG S, et al. Long-term dynamic optimization of wind-solar-based hydrogen supply chains integrating resource availability[J]. *Energy Conversion and Management*, 2026, 361: 121590. DOI:10.1016/j.enconman.2026.121590.

[3] ZHOU Q P, XIAO H, ZHOU C. Integrated microgrid with PV, energy storage, charging and swapping: Multi-time-scale coordinated planning of electric heavy truck power station in remote areas[J]. *Energy Conversion and Management*: X, 2026, 30: 101895. DOI:10.1016/j.ecmx.2026.101895.

[4] LUO M X, ZHANG Y X, NIE Y B, et al. Enhancement of thermal performance through improved heat transfer uniformity in a vertical latent heat thermal energy storage unit via the combination of annular and snowflake fins[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 67: 104170. DOI:10.1016/j.tsep.2025.104170.

[5] DU Z, LIU G, HUANG X Y, et al. Numerical studies on a fin-foam composite structure towards improving melting phase change[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 208: 124076. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124076.

[6] AHMED W, HUSSAIN A, SHAHID H, et al. Experimental study on heat storage properties comparison of paraffin/metal foams phase change material composites[J]. *Journal of Thermal Science*, 2024, 33(2): 469-478. DOI:10.1007/s11630-023-1828-5.

[7] FOK P J Y, UNIVERSITY N T, NG Z K, et al. High-performance phase change materials based on nanotextured Cu foam and paraffin for efficient thermal energy storage[J]. *ACS Applied Engineering Materials*, 2025, 3(2): 314-324. DOI:10.1021/acsaenm.4c00668.

[8] LI Y J, NIU Z Y, HUANG X Y, et al. Effect of pore density and filling ratio of metal foam on melting performance in a heat storage tank[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2025, 86(6): 1577-1600. DOI:10.1080/10407782.2023.2279290.

[9] REN Y X, JIN F, YANG L S, et al. Emerging porous supporting materials for form-stable organic phase change materials[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2025, 45: e01440. DOI:

- 10.1016/j.susmat.2025.e01440.
- [10] WEI X L, CHEN D D, ZHANG X C, et al. Experimental and simulation study on enhancing thermal energy storage and heat transfer performance of ternary chloride eutectic salt by doping MgO nanoparticles[J]. *Journal of Thermal Science*, 2024, 33(6): 2221-2234. DOI:10.1007/s11630-024-2023-z.
- [11] TAUSEEF-UR-REHMAN, ALI H M, JANJUA M M, et al. A critical review on heat transfer augmentation of phase change materials embedded with porous materials/foams[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 135: 649-673. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.001.
- [12] ZHANG L, ZHOU K C, WEI Q, et al. Thermal conductivity enhancement of phase change materials with 3D porous diamond foam for thermal energy storage[J]. *Applied Energy*, 2019, 233: 208-219. DOI:10.1016/j.apenergy.2018.10.036.
- [13] KHAN F S H, DIANI A. Study of heat transfer characteristics of PCMs melting inside aluminum foams[J]. *Materials*, 2025, 18(22): 5130. DOI:10.3390/ma18225130.
- [14] WAN Q, WANG M, HE L, et al. Heat storage and release process and numerical simulation of copper foam/paraffin composite phase change material[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(4): 2046-2053.
- [15] KUMAR N, SHRIVASTAVA A, SAHA S K, et al. Enhancing latent heat storage dynamics with expanded graphite foam: Myth vs. reality check through numerical and experimental investigations [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2025, 215: 109929. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2025.109929.
- [16] LU B H, ZHANG Y X, SUN D, et al. Experimental investigation on thermal properties of paraffin/expanded graphite composite material for low temperature thermal energy storage[J]. *Renewable Energy*, 2021, 178: 669-678. DOI: 10.1016/j.renene.2021.06.070.
- [17] GOUD RANGA N K, GUGULOTHU S K, GANDHI P. Thermal performance of nanoparticle-infused PCMs in honeycomb-finned cavities for high-efficiency heat storage[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 62: 103675. DOI: 10.1016/j.tsep.2025.103675.
- [18] NIE C D, DENG S X, LIU J W, et al. Nonuniform concentrated nanoparticles enhancing melting of phase change materials in vertical shell-tube storage unit with annular fins[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108254. DOI: 10.1016/j.est.2023.108254.
- [19] YANG S. Thermal energy storage and dynamic thermal management of 5G base stations based on graphene composite phase change materials[J]. *Thermal Science*, 2025, 29(6 Part A): 4257-4265. DOI:10.2298/tsci2506257y.
- [20] ZENG X X, YE L S, WANG C H, et al. Highly stable solid-solid phase change materials for battery thermal management systems [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 88: 111495. DOI:10.1016/j.est.2024.111495.
- [21] DAI X Y, PING P, KONG D P, et al. Heat transfer enhanced inorganic phase change material compositing carbon nanotubes for battery thermal management and thermal runaway propagation mitigation[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2024, 89: 226-238. DOI:10.1016/j.jechem.2023.10.001.
- [22] FAN R J, XU B, SHI L, et al. A scalable phase change material-based system enhanced by multi-walled carbon nanotubes and fins for efficient solar water heating applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108791. DOI: 10.1016/j.est.2023.108791.
- [23] NIE C D, DENG S X, LIU J W, et al. Numerical investigation on latent heat storage enhancement using a gradient-concentration nanoparticles phase change material[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 197: 117360. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117360.
- [24] HU J Y, HUANG W F, GE X, et al. Preparation of flexible composite phase change material with high thermal conductivity for battery thermal management[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 100: 113485. DOI:10.1016/j.est.2024.113485.
- [25] P T M S, BAL D K, SAHOO B B. A technical review on controlling the Li-ion battery temperature through composite phase change materials and hybrid cooling techniques[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 112: 115584. DOI:10.1016/j.est.2025.115584.
- [26] TAN Q L, LIU H F, SHI Y, et al. Lauric acid/stearic acid/nanoparticles composite phase change materials for energy storage in buildings[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 76: 109664. DOI: 10.1016/j.est.2023.109664.
- [27] GUPTA N, KUMAR A, DHASMANA H, et al. Enhanced thermophysical properties of Metal oxide nanoparticles embedded magnesium nitrate hexahydrate based nanocomposite for thermal energy storage applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 32: 101773. DOI: 10.1016/j.est.2020.101773.
- [28] VIJAY RAJ J, GUGULOTHU S K, HARISH R, et al. Enhanced solidification of dual sugar alcohol nanoenhanced phase change materials using tapered crossbar fins for solar thermal energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 142: 119654. DOI: 10.1016/j.est.2025.119654.
- [29] GUO J F, WEI P, HUANG X Y, et al. Radially graded metal foams arrangement in heat storage device of photothermal utilization systems[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023, 256: 112315. DOI:10.1016/j.solmat.2023.112315.
- [30] SHEN S X, ZHOU H W, DU Y R, et al. Investigation on latent heat energy storage using phase change material enhanced by gradient-porosity metal foam[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121760. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2023.121760.
- [31] 陶梦晓, 蔡锦龙, 姜峰, 等. 多孔介质复合相变材料孔隙结构优化与传热强化研究[J]. *储能科学与技术*, 2026, 15(1): 38-48.
- TAO M X, CAI J L, JIANG F, et al. Optimization of pore structure and heat transfer enhancement in porous composite phase change materials[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2026, 15(1): 38-48.
- [32] 于恒昌. 非均匀填充泡沫铜-石蜡复合相变材料储热性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2025.
- [33] HUANG X Y, LIU Z M, LU L, et al. Study on enhancement of heat release performance of phase change energy storage unit in solar heating and hydrogen production system[J]. *Renewable Energy*, 2026, 256: 123921. DOI:10.1016/j.renene.2025.123921.

- [34] WEI X Y, ZHANG N, ZHANG Z L, et al. Melting evaluation of phase change materials impregnated into cascaded metal foams with regionalized enhancement[J]. *Journal of Thermal Science*, 2025, 34(1): 223-241. DOI:10.1007/s11630-024-2064-3.
- [35] KONG J Y, ZUO H Y, ZENG K, et al. Investigation of optimization methods for metal foam with two-dimensional porosity gradient in shell-and-tube latent heat storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 63: 107004. DOI:10.1016/j.est.2023.107004.
- [36] 金虹庆. 泡沫金属复合相变材料熔化传热过程可视化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
JIN H Q. A visualized study of melting heat transfer of phase change material saturated in metal foam[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [37] LI C C, ZHAO X B, ZHANG B, et al. Stearic acid/copper foam as composite phase change materials for thermal energy storage[J]. *Journal of Thermal Science*, 2020, 29(2): 492-502. DOI:10.1007/s11630-020-1272-8.
- [38] GAO X Y, WEI P, YU J B, et al. Design and assessments on graded metal foam in heat storage tank: An experimental and numerical study[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 146: 106902. DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106902.
- [39] 白淼. 泡沫金属强化相变储热材料传热特性研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.
BAI M. Study on heat transfer characteristics of foam metal reinforced phase change materials[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2021.
- [40] TIAN Y, ZHAO C Y, ASME. Thermal Analysis in Phase Change Materials (PCMs) Embedded with Metal Foams; proceedings of the 14th International Heat Transfer Conference, Washington, DC, F Aug 08-13
- [41] 牛冬茵. 复合相变蓄热单元传热特性及组合式电供暖装置应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.
NIU D Y. Study on heat transfer characteristics of composite phase change heat storage unit and application of combined electric heating device[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2025.
- [42] KUMAR A, SAHA S K. Performance study of a novel funnel shaped shell and tube latent heat thermal energy storage system [J]. *Renewable Energy*, 2021, 165: 731-747. DOI: 10.1016/j.renene.2020.11.023.
- [43] PUNNIAKODI B M S, SENTHIL R. A review on container geometry and orientations of phase change materials for solar thermal systems[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 36: 102452. DOI:10.1016/j.est.2021.102452.
- [44] VYSHAK N R, JILANI G. Numerical analysis of latent heat thermal energy storage system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(7): 2161-2168. DOI:10.1016/j.enconman.2006.12.013.
- [45] SEDDEGH S, TEHRANI S S M, WANG X L, et al. Comparison of heat transfer between cylindrical and conical vertical shell-and-tube latent heat thermal energy storage systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 130: 1349-1362. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.130.
- [46] LU B H, ZHANG Y X, WANG Z H, et al. Effect of shell shape on the charging and discharging performance of a vertical latent heat thermal energy storage unit: An experimental study[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 56: 105996. DOI: 10.1016/j.est.2022.105996.
- [47] MOHAGHEGH M R, MAHMUD S, TASNIM S. Effect of geometric configurations on the thermal performance of encapsulated PCMs [C]// ASME 2021 Heat Transfer Summer Conference Collocated with the ASME 2021 15th International Conference on Energy Sustainability, June 16-18, 2021, Virtual, Online. 2021 DOI: 10.1115/HT2021-63181.
- [48] CHEN L X, FAN A W. Effects of shell modifications and operational parameters on melting uniformity of a vertical multi-section shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105593. DOI:10.1016/j.est.2022.105593.
- [49] LI Y J, HUANG X Y, HUANG X Y, et al. Machine learning and multilayer perceptron enhanced CFD approach for improving design on latent heat storage tank[J]. *Applied Energy*, 2023, 347: 121458. DOI:10.1016/j.apenergy.2023.121458.
- [50] ABD DAIM E, SAKAMI S, BOUKHATTEM L. Numerical analysis of the impact of various parameters on the axial temperature distribution in a packed bed for thermocline energy storage[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 68: 104355. DOI:10.1016/j.tsep.2025.104355.
- [51] KURŞUN B, BALTA M, POLAT F. Simultaneous evaluation of charge/discharge times and energy storage/release capacities in multi-tube latent heat energy storage with metal foam-enhanced PCM[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 108: 115090. DOI:10.1016/j.est.2024.115090.
- [52] PU L, ZHANG S Q, XU L L, et al. Thermal performance optimization and evaluation of a radial finned shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 166: 114753. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114753.
- [53] LI W, WANG J, ZHANG Y L, et al. Numerical study and parametric analysis on performance enhancement of a latent heat storage unit with fractal fins[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105814. DOI:10.1016/j.est.2022.105814.
- [54] ZHANG Y, WANG Z, LU B, et al. Enhancement of charging and discharging performance of a latent-heat thermal-energy storage unit using snowflake-shaped fins[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(2): 521-30.
- [55] SONG Z L, WANG J, SHAO Z Y, et al. Performance optimization of thermal storage device based on bionic tree-shaped fins and eccentric arrangement[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 157: 107774. DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107774.
- [56] ZHANG S Q, PU L, XU L L, et al. Melting performance analysis of phase change materials in different finned thermal energy storage [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 176: 115425. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115425.
- [57] ESSA M A, ROFAIEL I Y, AHMED M A. Experimental and theoretical analysis for the performance of evacuated tube collector integrated with helical finned heat pipes using PCM energy storage[J]. *Energy*, 2020, 206: 118166. DOI:10.1016/j.energy.2020.118166.

- [58] ZHANG N, CAO X, FAN X Y, et al. Thermal storage performance of latent heat thermal energy storage device with helical fin under realistic working conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121668. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2023.121668.
- [59] ZHANG S Q, MANCIN S, PU L. A review and prospective of fin design to improve heat transfer performance of latent thermal energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 62: 106825. DOI:10.1016/j.est.2023.106825.
- [60] SONG Z L, JING H G, WANG J, et al. Design of multi-pipe latent heat storage device based on bionic topological optimization[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 263: 125402. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.125402.
- [61] ZHANG Y, LIU D Y, MA J L, et al. Improvement of heat transfer and reaction performance of a K_2CO_3 fixed-bed energy storage reactor using topology optimization[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 111: 115443. DOI:10.1016/j.est.2025.115443.
- [62] 毛前军, 陈凯莉. 楔形管壳式蓄热罐的传热性能[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(11): 3658-3666.
MAO Q J, CHEN K L. Heat transfer performance study of wedge-shaped shell-and-tube heat storage tank[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(11): 3658-3666.
- [63] MEHRAJ N, MATEU C, ZSEMBINSZKI G, et al. Optimizing the design of TES tanks for thermal energy storage applications through an integrated biomimetic-genetic algorithm approach[J]. *Biomimetics*, 2025, 10(4): 197. DOI:10.3390/biomimetics10040197.
- [64] 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.
- [65] KOCIJEL L, MRZLJAK V, GLAŽAR V. Numerical analysis of geometrical and process parameters influence on temperature stratification in a large volumetric heat storage tank[J]. *Energy*, 2020, 194: 116878. DOI:10.1016/j.energy.2019.116878.
- [66] SUN B B, YU Q H, WANG R M, et al. Regulation mechanism of thermal stratification in a single-tank sensible heat storage system using density-matched particles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2026, 285: 129262. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.129262.
- [67] ABDULLHUSSEIN H A, MUSSA M. A review of fin geometry and design for performance enhancement in latent heat thermal energy storage systems[J]. *Heat Transfer*, 2026, 55(1): 290-313. DOI:10.1002/htj.70076.
- [68] ZAREI M J, BAZAI H, SHARIFPUR M, et al. The effects of fin parameters on the solidification of PCMs in a fin-enhanced thermal energy storage system[J]. *Energies*, 2020, 13(1): 198. DOI:10.3390/en13010198.
- [69] LV L Q, HUANG S Y, ZOU Y, et al. Thermal performance investigation of a novel medium-temperature pilot-scale latent heat storage system at different charging and discharging temperatures[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 418: 138130. DOI:10.1016/j.jclepro.2023.138130.
- [70] AL-ABIDI A A, MAT S, SOPIAN K, et al. Experimental study of melting and solidification of PCM in a triplex tube heat exchanger with fins[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 68: 33-41. DOI:10.1016/j.enbuild.2013.09.007.
- [71] SHU G, XIAO T, GUO J F, et al. Effect of charging/discharging temperatures upon melting and solidification of PCM-metal foam composite in a heat storage tube[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 201: 123555. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123555.
- [72] LIU L, YU H X, TIAN B, et al. A comprehensive investigation of phase change energy storage device based on structural design and multi-objective parameter optimization[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 272: 126374. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126374.
- [73] YIN J B, WANG S S, YE M Y, et al. Heat transfer characteristics of topology-optimized fins in latent heat storage systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 250: 123480. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.123480.
- [74] 金波, 李明佳, 徐阳, 等. 双层填充床储热器储热性能实验研究[J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(7): 80-86.
JIN B, LI M J, XU Y, et al. Experimental study on the thermal performance of a thermal storage with double-layered packed bed [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(7): 80-86.
- [75] DU J, LI F, JIA S A, et al. Experimental investigation of energy storage/discharge characteristics in a finned latent shell-and-tube heat collector under different operating conditions[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, 73: 106498. DOI:10.1016/j.csite.2025.106498.
- [76] LI J Y, WANG J F, HU H W, et al. Optimization of solar phase change accumulator performance under the influence of multiple factors[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 57: 103201. DOI:10.1016/j.tsep.2024.103201.
- [77] ZHU Y X, QIU Y. Comparison of thermal performance between annular fins and longitudinal fins in latent heat storage unit[J]. *Journal of Thermal Science*, 2023, 32(3): 1227-1238. DOI: 10.1007/s11630-023-1731-0.
- [78] DARDOURI S, MEDJAHED B, ARICI M, et al. Comparative thermal analysis of heat transfer fluid injection orientation in phase change material based latent heat thermal energy storage systems[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2026. DOI:10.1007/s10973-026-15288-8.
- [79] 张金亚, 周文博, 程紫漪. 基于LBM的泡沫金属与翅片相变储能系统性能对比分析[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(2): 598-607. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0570.
ZHANG J Y, ZHOU W B, CHENG Z. Performance comparison of metal foam and fin phase-change energy storage system based on LBM[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(2): 598-607. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0570.
- [80] REN F, SONG Z L, LI Q B, et al. A combined strategy of copper foam and topology-optimized fins for latent heat storage: Thermal analysis and multi-objective optimization[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2026, 264: 128791. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.128791.