

文章编号:0253-4339(2023)01-0001-13

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2023.01.001

相变储能技术的传热强化方法综述

张春伟^{1,2,3} 陈静¹ 王成刚¹ 景卓¹ 张学军^{2,3} 江龙^{2,3}

(1 北京航天试验技术研究所 北京 100074;2 浙江大学制冷与低温研究所 杭州 310027;

3 浙江省制冷与低温技术重点实验室 杭州 310027)

摘要 相变储热技术能够解决热能传递过程中的时空不连续问题,可有效减少热能的损耗,加速中国碳中和目标实现进程。但受限于相变材料的低导热特性,实际应用中的相变储热系统均需配置相应的传热强化装置,使系统复杂性和投资成本大幅增加。本文对相变储热技术的传热强化方法进行了简要分类,即单一传热强化技术、组合传热强化技术、多级传热强化技术以及液态 PCM 流动强化技术,并对后三者的不足进行阐述和说明。同时,基于相应结论,归纳总结了热源与热汇的三种相对几何关系,即扩张式、平行式和收缩式,可有效指导相变储热器结构总体设计。最后,对相变储热技术的未来应用进行了展望,应基于热力学和系统论等知识,从系统层面完成相变储热器的设计,实现热力学性能和经济性的最优。

关键词 相变;对流;传热;强化;储热

中图分类号:TB64;TK124

文献标识码:A

Review on Heat Transfer Enhancement Methods of Latent Heat Storage Technology

Zhang Chunwei^{1,2,3} Chen Jing¹ Wang Chenggang¹ Jing Zhuo¹ Zhang Xuejun^{2,3} Jiang Long^{2,3}

(1. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing, 100074, China; 2. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China; 3. Key Laboratory of Refrigeration and Cryogenic Technology of Zhejiang Province, Hangzhou, 310027, China)

Abstract Latent heat storage (LHS) technology can solve the time-space non-continuity in the transfer process of thermal energy, which can effectively reduce heat loss and accelerate the realization of China's carbon neutrality goal. However, the LHS system in practical applications needs to be equipped with heat transfer enhancement devices, considering the low thermal conductivity of phase change materials (PCMs), which significantly increases the system complexity and capital cost. In this review, heat transfer enhancement methods, namely single heat transfer enhancement technology, combined heat transfer enhancement technology, multi-stage heat transfer enhancement technology, and liquid PCM flow enhancement technology, are briefly classified. The corresponding shortcomings of the last three technologies are described and explained. Based on the obtained conclusions, three relative geometric relations between the heat source and heat sink are summarized, namely the expansion type, parallel type, and contraction type, which can effectively guide the overall design of the latent heat storage units. Finally, the future application perspectives of latent heat storage technology are discussed. It is necessary to design latent heat storage from the system level based on knowledge of thermodynamics and system theory to achieve optimal thermodynamic performance and economic efficiency.

Keywords phase change; convection; heat transfer; enhancement; heat storage

能源是人类文明进步的基础和动力,攸关国计民生和国家安全,对于促进经济社会发展至关重要^[1]。能源开发和利用推动了人类社会的发展和世界经济繁荣,但同时也对人类自身生存所依赖的环境造成了严重破坏。为推进人类整体生态文明建设及中国自

身可持续发展,中国在联合国大会发表相关声明:“力争 2030 年前 CO₂ 排放达峰,努力争取在 2060 年前实现碳中和”。实现零碳目标,意味着对中国现有的能源系统进行重大改革。根据能源基金会发布的《中国碳中和综合报告 2020》内容^[2],实现中国净零

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB0603702)和国家自然科学基金(51976178)资助项目。(The project was supported by the National Key R&D Program of China (No. 2017YFB0603702) and the National Natural Science Foundation of China (No. 51976178).)

收稿日期:2022-03-12;修回日期:2022-05-09

碳排放的路径需要建立在以下五项策略基础上,即可持续能源消费、电力部门脱碳、终端用能部门电气化、非电力低碳燃料转换和负排放。至 2050 年,电力行业的碳排放量将为零或负值,而建筑行业、工业部门和交通行业的碳排放量相比于 2015 年则将分别减排约 90%、90%和 80%。

据统计,90%的全球能源预算是围绕热能进行的^[3],在整个能源的传递、转换和储存链条中处于核心位置,而储能技术则是能源传输链的重要补充。与其他储能方式相比,储热技术除在响应速度、环境影响和安全运行等方面具有优势外^[4],面向对象更广且应用成本更低^[5],所以储热技术的推广应用可有效降低碳排放,加速中国零碳目标的实现。按照储热方式不同,可分为显热储热、化学储热和固液相变储热^[6]。对比之下,相变储热具有储能密度大、温度恒定和稳定性好等优点^[7],在余热回收^[8]、太阳能热利用^[9]、建筑节能^[10]、纺织^[11]、电子设备控温^[12]、动力电池热管理^[13]和低温冷链^[14]等领域展现了较好的应用前景,正处于从实验室阶段到中试阶段的快速发展期。

相变材料(phase change materials, PCM)是相变储热技术推广应用的基础,通常可分为有机类和无机类两种。绝大多数无机 PCM 具有腐蚀性,且易产生过冷和相分离问题;有机类 PCM 几乎没有上述缺点,且化学性能稳定,如最常见的中低温有机 PCM 石蜡,但有机 PCM 的导热系数明显低于无机 PCM。一般而言,可大规模推广应用的 PCM 应具备以下特征:价格低廉、储能密度大、资源丰富、无毒、腐蚀性小、化学性能稳定等。因此在选择储热材料时,首先考虑合适的相变温度和储能密度,再结合实际情况综合考虑其他因素。同时,限制相变储能技术推广应用的主要原因之一是 PCM 自身的低导热特性,除相变金属合金外,绝大多数 PCM 的导热系数均在 0.1~2.0 W/(m·K)之间,所以需要研发相应的传热强化方法,这也是相变储热技术的主要研究方向。

本文根据传热强化方法的差异,对相变储热技术的传热强化方法进行了简要分类,即单一传热强化技术、组合传热强化技术、多级传热强化技术和液态 PCM 流动强化技术。由于单一传热强化技术的应用较为成熟,本文不再赘述,重点论述后三种技术。

1 组合传热强化技术

大部分 PCM 导热能力可以通过单一使用翅片、泡沫金属、高导热纳米颗粒等方法提高,但将两种或多种强化技术组合是否能获得更优的强化结果值得

探讨,所以近年来学者们对组合式强化技术进行了初步研究,组合式结构的基本构架主要包括热管、泡沫金属、翅片和纳米粒子等。

1.1 翅片和热管复合

热管在相变储热系统中得到了一定应用,而为了进一步扩展传热面积,翅片化热管的使用逐渐常态化。B. Horbaniuc 等^[15]建立了一种使用纵向翅片热管的相变储热器数学模型,该模型考虑了热管壁面传热引起的径向凝固和翅片传热引起的角凝固。模拟结果表明,总凝固时间随翅片数的增加而减少。S. Lohrasbi 等^[16-17]研究了采用翅化热管的相变储热系统放热过程,具体结构如图 1 所示。结果表明,与单一热管相比,使用 V 型翅片、轴向翅片和径向翅片后可使凝固速率分别提升 4.214 倍、3.309 倍和 3.582 倍。所以,使用热管和翅片可以增加热穿透深度。

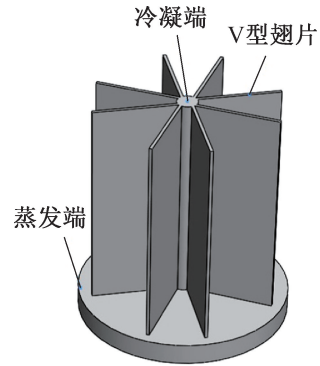


图 1 采用 V 形翅片热管式相变储热器^[17]

Fig.1 Heat pipe LHS using V-shaped fins^[17]

S. Tiari 等^[18]研究了三维圆柱式翅片热管相变储热系统的 PCM 熔化特性,分析热管布置方式、热管数量和自然对流对系统性能的影响。结果表明,翅片化热管可有效减少系统内部热阻,而热管结构和数量对 PCM 熔化作用显著。同时,自然对流对相变材料熔化过程的影响不可忽略。

1.2 翅片和纳米粒子复合

S. Lohrasbi 等^[19]研究了包含 V 形翅片和纳米颗粒的相变储热系统的放热过程。结果表明,加入纳米颗粒有效提高了 PCM 的导热系数,并在一定程度上加速相变过程。J. M. Mahdi 等^[20]对采用翅片和纳米颗粒的三套管储热器 PCM 熔化过程进行了数值研究,结构如图 2 所示。结果表明,使用翅片和纳米颗粒的组合比单一使用纳米颗粒更有效。同时,HTF (heat transfer fluid) 温度的升高有助于缩短 PCM 熔化时间,提高纳米颗粒与翅片组合的应用潜力。

M. Parsazadeh 等^[21]研究了在有翅片和纳米颗粒存在的情况下,壳管式储热单元中 PCM 的熔化过

程。结果表明,纳米颗粒的强化效果随翅片参数变化。M. Mahdavi 等^[22]研究了热管和纳米粒子强化下的壳管式相变储热系统,建立了瞬态二维轴对称模型,研究了热管数、体积分数和纳米颗粒类型对系统热特性的影响。结果表明,增加热管的数量,可以加速熔化,并使内部温度分布更均匀。随着纳米颗粒体积分数从 0 增至 10%,熔化时间减少 25%。

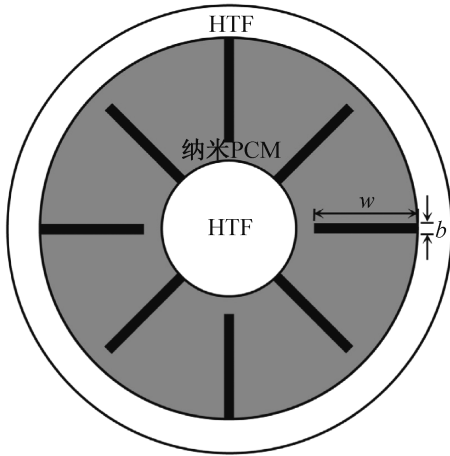


图 2 采用轴向翅片与纳米粒子组合强化的壳管式相变储热器^[20]

Fig.2 A shell and tube type LHS unit enhanced by the combination of axial fin and nano particles^[20]

1.3 翅片和泡沫金属复合

Zhu Feng 等^[23]采用数值方法研究了翅片和具有变孔隙率的泡沫金属对 PCM 储热系统传热性能的强化作用。结果表明,随着孔密度的增加,自然对流换热得到抑制,进而降低了 PCM 储热性能;增加翅片厚度会提升储能系统的平均功率;此外,同时使用翅片和泡沫金属产生了一个相互促进的交互作用,提高了相变速率。P. V. S. S. Srivatsa 等^[24]对使用泡沫铝和交叉板翅片的 PCM 热沉进行了数值研究。为评估该系统在熔化过程中的性能,分析了液态 PCM 的最大流速和基壁温度等参数。结果表明,当泡沫铝的孔隙率恒定且孔密度较高时,自然对流作用较弱;另一方面,在孔密度恒定且孔隙率较高时,观察到较高的流速。Xie Yongqi 等^[25]实验研究了采用翅片和泡沫铜组合的相变蓄热装置传热性能。结果表明,与单一泡沫铜相比,使用翅片和泡沫铜组合技术的 PCM 熔化速率更快。Feng Shangsheng 等^[26]采用数值方法研究了使用平板翅片和泡沫金属组合的 PCM 熔化过程,其结构如图 3 所示。通过分析温度和液化率,研究翅化泡沫金属的热特性,并与单一平板翅片和泡沫金属的结果进行了对比,证明了使用该组合在提高 PCM 导热系数方面的优异性。

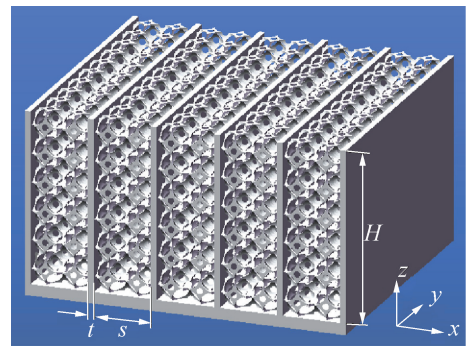


图 3 采用泡沫金属与翅片组合的相变储热器^[26]

Fig.3 LHS unit enhanced by the combination of metal foam and fins^[26]

1.4 热管和泡沫金属复合

K. Nithyanandam 等^[27]提出一种泡沫金属与热管组合的相变储热系统,研究了不同热管布置方式和泡沫金属参数对系统储放热性能的影响,如图 4 所示。结果表明,由于浮升力引起的自然对流形成受到限制,所以储热过程中传热速率随着孔密度的增大而减小;而自然对流在放热过程中的作用可以忽略不计,且使用泡沫金属可增加有效传热表面积,所以放热时的情况正好相反。

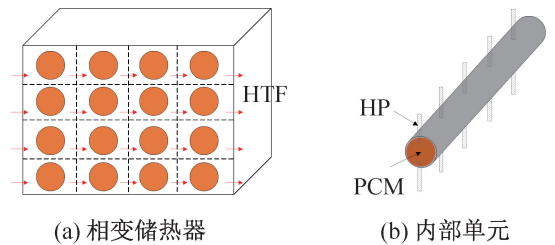


图 4 采用热管与泡沫金属的相变储热器和内部单元^[27]

Fig.4 LHS system enhanced by the combination of heat pipes and metal foam and internal unit^[27]

Ren Qinlong 等^[28]研究了热管、泡沫金属和纳米颗粒强化下的 PCM 熔化过程,分析了泡沫金属的孔隙率和孔径、纳米颗粒的体积分数和热管半径对系统性能的影响。结果表明,存在最佳的泡沫金属孔隙率和热管半径使系统存储效率更高,同时使用泡沫金属比纳米颗粒能更有效地提高 PCM 的传热能力。

1.5 泡沫金属和纳米粒子复合

泡沫金属虽然可以大幅提高导热系数,但也会在一定程度上抑制在熔化过程中起着重要作用的自然对流。与固定传热强化结构相比,可分散在 PCM 中的纳米颗粒能保持流体状态,所以一些学者也致力于探究纳米颗粒和泡沫金属组合的性能。R. Hossain 等^[29]提出一种使用泡沫铝和氧化铜纳米颗粒组合的 PCM 传热强化方法,结果表明,使用泡沫铝会导致熔

化前沿的加速运动,且使用组合技术比单一技术产生更好的性能。

J. M. Mahdi 等^[30]研究了在氧化铝纳米颗粒和泡沫铜组合下,三套管相变储热系统中 PCM 的凝固过程,选取纳米颗粒浓度和孔隙率为研究参数,以相变前沿、温度分布和液化率为分析对象,结构如图 5 所示。研究表明,使用泡沫铜可显著提升凝固速率,而在此基础上使用纳米粒子可进一步提升。同时,多孔介质-纳米颗粒组合的凝固速率高于单独使用纳米颗粒或单独使用多孔介质的凝固速率。作者还进行了利用纳米颗粒和泡沫金属强化 PCM 熔化的研究。除了一些与前文相似的结果外,还指出凝固过程与熔化过程之间存在的一些关键性差异^[31]。

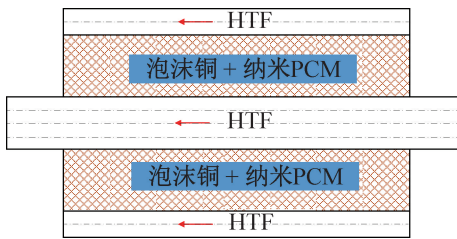


图 5 采用泡沫金属与纳米颗粒的套管式相变储热单元^[30]
Fig.5 Three-tube LHS unit enhanced by the combination of metal foam and nano particles^[30]

综上所述,目前的强化组合一般只是随机性选取,并简单进行对比性测试,遴选规则和组合的传热强化机理尚不明确。Zhang Chunwei 等^[32-33]通过量化对比以及多目标优化技术系统分析了 HP-Fin (热管+翅片)、HP-CF (热管+泡沫铜)和 HP-Fin-CF (热管+翅片+泡沫铜)三种组合的特性。结果表明,HP-Fin 组合可以更好地强化熔化性能,而 HP-CF 组合则可以更好地强化凝固过程。与另两组合相比,HP-Fin-CF 组合具有最佳的传热强化性能,除具有较强的空间传热能力外还可以引起增强熔化的自然对流,可将该特征作为传热强化元件的组合准则。所以,组合式传热强化技术的强化机理需要厘清,充分发挥各组合元件的优势。此外,不同技术的强化效果严重依赖于其体积用量,所以需要在相应约束下,分析对比不同强化技术的性能。最后,在设计组合式传热强化相变储热装置时,必须考虑实现导热和自然对流的平衡。

2 多级传热强化技术

将多个不同相变温度的 PCM 按照一定顺序排列组成多级相变储热系统,有助于提高平均温差,整体上提高系统的传热效率。一种布置方式是按传热流

体 (HTF) 流动方向进行布置,如图 6 所示;另一种布置方式是沿热流传输方向布置,例如沿 HTF 流动的垂直方向由内而外布置相变温度逐渐降低的相变材料,具体结构如图 7(a) 所示。国内外学者对多级相变储热系统进行了广泛研究。

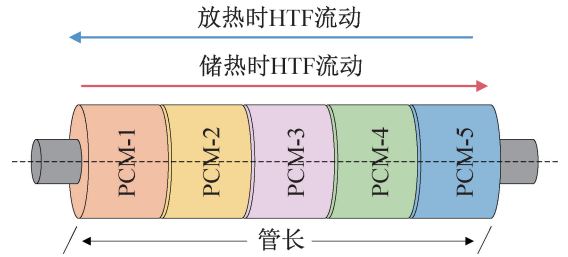


图 6 多级串联相变储热系统

Fig.6 Multi-stage phase change heat storage system

2.1 多级系统性能分析

Gong Z. 等^[34]通过有限元法分析了适用于太阳能发电系统的 5 级壳管式相变储热单元的性能,所选 PCM 的相变温度分别为 767、717、667、617、567 °C,并假设除相变温度外其他物性均相同。结果表明,多级 PCM 单元的储放热速率提高约 35.1%,同时储热过程的过热和放热过程的过冷现象均被弱化。

Wang Jianfeng 等^[35-36]分析表明,抛物线型的相变温度变化可以更好地加快相变速率,但该类型的 PCM 实际上并不存在,所以可选取多个具有不同相变温度的 PCM 进行代替,使系统总体相变温度分布尽可能接近抛物线^[35,37]。与具有恒定相变温度的单个 PCM 相比,使用 5~10 种 PCM 时,熔化时间减少可达 50%。S. Shaikh 等^[38]模拟研究了使用 2 级 PCM 和 3 级 PCM 的平板相变储热单元内 PCM 的相变特性。重点分析了不同 PCM 排列方式的影响,即并联、串联和矩阵式排列,如图 7 所示。对于并联和串联排列,PCM 分别根据相变温度从上至下或从左至右排列,对于矩阵排列,沿左或右对角线排列。总体而言,与单级 PCM 相比,串联、并联和矩阵布置形式均显著提高了能量存储率,增幅分别约为 21%~27%、15%~21%和 9%~15%。

H. A. Adine 等^[39]对壳管式多级 PCM 储热单元进行了数值研究,对比分析了单级 PCM (石蜡 P116) 和双级 PCM (石蜡 P116 和正十八烷)的系统性能,两种 PCM 的相变温度分别为 50、27.7 °C。此外,在储热过程研究了 HTF 入口温度、质量流量和 PCM 用量对系统性能的影响。结果表明,系统参数对性能影响较大,对于较低的 HTF 质量流量,2 级 PCM 单元的系统效率要高,对于较高的 HTF 入口温度,仅在部分熔化时,2 级 PCM 装置才能获得较好的效率。

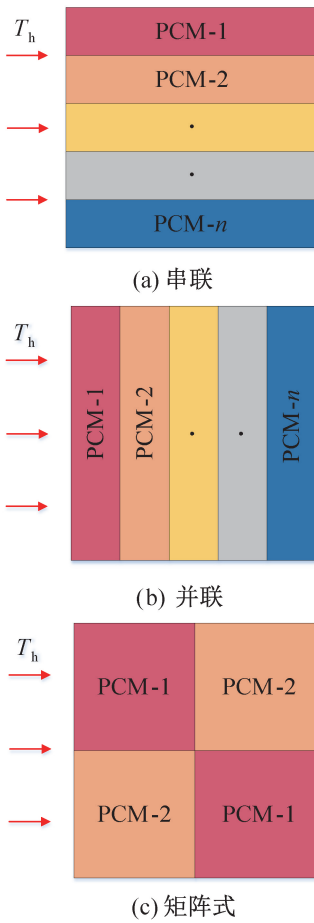


图 7 串联、并联及矩阵式多级相变储热系统^[38]
Fig.7 Cascaded, parallel and matrix multi-stage LHS system^[38]

Wang Peilun 等^[40]提出了可用于多级 PCM 储热单元的曲折板结构,如图 8 所示。将相变温度为 713.15 K 的 NaCl-MgCl₂ 作为基准 PCM,并假定其他两个 PCM 的相变温度与基准 PCM 分别相差 10、20、30、45、50 K,最后搭建实验装置验证数学模型的准确性。与使用单一 PCM 的储热单元相比,多级 PCM 的熔化速率显著提高。然而,对于多级相变储热单元的 PCM 合理选择,并没有明确的指导方法,因为这需要考虑多个变量的全局优化,在实际应用中较难实现。

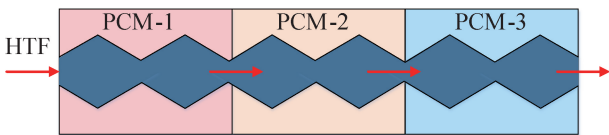


图 8 采用锯齿形管的多级相变储热系统^[40]
Fig.8 Multi-stage LHS system using sawtooth tubes^[40]

M. Ezra 等^[41]提出了阵列式多级 PCM 管式相变储热器,HTF 流过 PCM 管组,如图 9 所示,建立了一个分析模型来评估系相变温度差值、行数、材料数、入

口 HTF 温度和质量流量等参数对系统性能的影响。对于多 PCM 系统,存在一个最佳相变范围,使熔化速率最大。当系统中行数无限大时,通过解析表达式可知,使用两种 PCM 材料可将性能提高约 25%,而当行数与使用的 PCM 材料数量相同时,可提高 50%。此外,采用多级 PCM 排列可以产生相对单级 PCM 更优的传热性能,但前提是 PCM 的选择是最佳的。此外,郭绍振等^[42]对泡沫金属复合相变材料的两级串联式装置的储热特性进行了数值分析与验证,获得了两种不同熔点复合相变材料进行梯级组合时蓄热装置最佳蓄热工况。

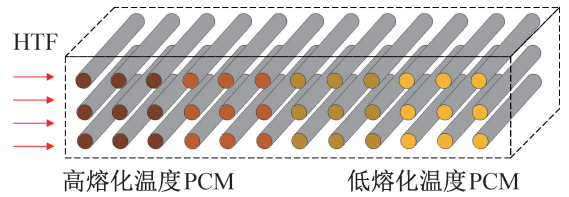


图 9 阵列式多级相变储热系统^[41]
Fig.9 Array type multi-stage LHS system^[41]

综上所述,多级相变储热技术拓宽了存储热能的温度范围,并降低了出口热 HTF 的温度,进而可有效改善热性能。但在上述研究中,PCM 的应用主要基于任意选择,且 PCM 的顺序仅根据熔化温度进行简单线性排列。事实上,多级相变储热系统的性能还取决于不同级间 PCM 用量、导热系数、相变焓和排列方式等参数。简而言之,目前国内外对多级相变储热系统的研究尚无较为成熟的物理与数学模型。所以,合理设计多级相变储热系统中的 PCM 参数至关重要,这在很大程度上取决于理论分析。多级相变储热技术的基础出发点是扩展 HTF 与 PCM 间的传热温差,进而将沿 HTF 流向的输入热流大小均匀化,所以合理的多级相变系统应是从温位层面实现串联。

2.2 第二定律分析及优化

在相变储热系统中,不可逆损失主要由于传热流体和相变材料之间的温差造成,而使用多种相变材料可以减少不可逆损失。同时,多级系统中 PCM 的相变温度、排列方式等均影响系统整体性能,理论分析是减少不可逆损失的有效方法。可借助热量^[43]、焓^[44]、熵^[45]和焓^[46]等概念。值得注意的是,焓和熵与有用功有关,且两者也相互关联。焓代表物体向另一个物体传热的能力。考虑到热量概念仅关注热能的量而忽略了质,因此最近进行的大多数研究均基于热力学第二定律的焓、熵、焓。

H. Bjurstrom 等^[47]在显热和潜热存储系统的第二定律分析方面做了开创性的工作。J. S. Lim

等^[48-49]的后期工作证实了采用多级相变材料可以提高相变储热系统的焓效率。多级 PCM 存在一个最佳相变温度组合,可在给定工况下实现第二定律效率最大化,其中单级 PCM 的最佳相变温度可以表示为: $T_{m,opt} = (T_{ambient} T_{source})^{0.5}$ 。T. Kousksou 等^[50]对集成在太阳能空气加热系统中的相变储热单元进行了数值研究,该单元使用球形胶囊封装的 PCM。通过焓分析,研究了 PCM 相变温度和 HTF 流速对焓效率的影响。结果表明,多级 PCM 比单级 PCM 具有更显著的热力学优势。同时,选择相变温度适当的 PCM 对于获得最小不可逆损失至关重要。总之,需要对许多参数进行非常系统且严格的分析计算,才能使多级 PCM 的性能达到最佳。

Cheng Xiwen 等^[51]对适用于冷库的三级填充床相变储热系统的性能进行了研究,模拟和实验结果证明了多级 PCM 相对于单级 PCM 在减少焓损失、提高储能率和减少储存时间方面的优势。Xu H. J. 等^[52]基于焓和熵理论优化多级相变储热系统。结果表明,焓优化中的热效率高于熵优化中的热效率,而熵优化中的焓效率优于焓优化中的热效率。然而,上述研究中的最佳相变温度均是在固定传热速率或固定不可逆热损的约束下得出的,计算过程复杂,在实际应用中也存在一定的局限性。

多级排列技术在相变储热系统传热强化方面具有显著优势,仅通过不同熔点的 PCM 即可扩大整个传热过程中的温差。但为了获得相变温度的解析表达式,需假定多级相变储热系统处于静态,即每一级的 PCM 质量相同并都处于相变状态。但在实际应用中,PCM 的储热和放热过程均为动态,因此显热存储的影响不可忽略,尤其在冷源和热源之间温差很大的情况下。此外,由于每一级的参数不同,PCM 的相变过程通常不同步。所以,在进行多级相变储热系统的数值预测或设计之前,同时优化 PCM 的相变温度和质量至关重要。

Zhang Chunwei 等^[53-54]提出了可以计算子级 PCM 质量的新型分析方法。针对小温差稳态工况,采用基于流量信息和质量数据的温焓图(其中焓是指冷物流的焓流, kW)实现多级系统的分析和改进,如图 10 所示。温焓图($T-H$)是实现夹点分析可视化的有效方法。冷、热 HTF 可以类比为热集成系统中的常规冷、热流体,而处于相变温区的相变材料可以视为温度恒定的过程流体。同时,上述类比过程需要假定多级相变储热系统的显热占比是可忽略的,进而限制其稳态、小温差的应用范围。基于相应的分析和改进步骤,可将多级相变系统的优化过程通

过图解的方法展示,并实现整体效率提升。针对复杂非稳态热源,则提出了能描述子级间相互作用的动态传热模型,结合 DE 算法指导多级相变储热系统设计,获得了更符合实际应用工况的多级相变系统热力特性。

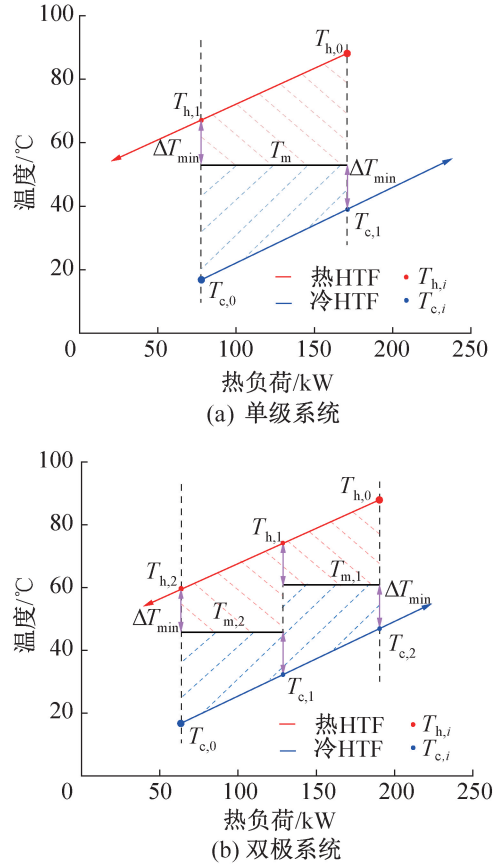


图 10 基于温焓图法的单级和双级系统传热分析^[53]

Fig.10 Heat transfer analysis of single-stage and double-stage LHS system based on temperature enthalpy diagram^[53]

3 液态 PCM 流动强化技术

影响传热速率的主要因素除了常规的导热系数、传热面积和温差外,对 PCM 相变过程中的流动状态改变也逐渐成为近年来的主要研究方向。根据流动强化方法的不同,相关研究可分为被动式流动强化和主动式流动强化。被动式强化主要是指在不增加外作用场的情况下,通过调整相变储能器倾角,实现液态 PCM 流动的增强;主动式强化主要是指通过增加外作用场来强化液态 PCM 的流动状态。

3.1 被动式流动强化

研究表明,自然对流的存在增强了储热装置的内部传热^[55],而倾角会通过改变方腔内的 Nu 来影响自然对流的强度^[56],所以方腔倾角对 PCM 的熔化过程

也有影响。近年来,关于相变储热器倾角对熔化的影响已经着了一些初步探讨,但由于不同研究中关于倾角的定义差异巨大,所以在综述相关研究时,需对定义倾角的基准方向进行初步总结。

N. Sharifi 等^[57](竖直方向)研究了 PCM 在圆柱壳体中的熔化行为,加热棒与圆柱壳体同心放置。实验测量表明,储热单元倾斜会影响 PCM 的温度和固液分布演化过程。R. Baby 等^[58](方向未知)实验评估了倾角(0°、90°、180°)对填充 PCM 的泡沫铜热沉传热能力的影响。在熔化时间为 160 min 时,热沉底部温度分别为 49.92、50.42、51.19 °C,所以当热沉的倾角为 0° 时,传热性能最好,如图 11 所示。D. Groulx 等^[59](竖直方向)模拟分析了用于光伏板温控的方腔 PCM 熔化过程,倾角变化范围为 0°~90°。结果表明,当倾角为 0°~60° 时,PCM 的熔化以对流换热为主,储能速率相差较小;而当倾角为 90° 时,方腔内 PCM 出现明显的热分层现象,传热机制基本为热传导。B. Kamkari 等^[60](水平方向)实验研究了矩形方腔内 PCM 在不同倾角下熔化的动态热特性。结果表明,方腔倾角对自然对流的形成影响显著,当倾斜角度从 90° 减小至 0° 时,方腔内的对流增强。当方腔倾角为 0° 和 45° 时,内部 PCM 的总熔化时间比 90° 倾角方腔的 PCM 分别少 53% 和 35%,而平均 Nu 则分别为 2.1 倍和 1.7 倍。S. Seddegh 等^[61]对比了石蜡在水平和垂直放置的壳管式相变储热单元中的熔化特性。当 PCM 的上半部分熔化时,水平放置单元的传热更有效,而当下半部分 PCM 熔化时,水平放置的熔化速率则相对较差,但在整个储热过程中,水平放置时的效果优于竖直放置。Y. Pahalmi 等^[62](水平

方向)对管壳式换热器内相变材料的熔化进行了研究,分析纳米颗粒和倾角对材料性能的影响。结果表明,倾角越大,熔化速度越快,熔化总时间越短,即竖直放置时,性能最优。

I. Al Siyabi 等^[63](竖直方向)通过模拟和实验研究了倾角对壳管式相变储热系统性能的影响,考虑了 90°、45°、0° 三个不同的倾角。结果表明,当倾角为 45° 时,PCM 的熔化速度比 0° 和 90° 倾角快,比 0° 倾角时的熔化时间缩短了 13%;当为倾角为 90° 时,储能器下部的 PCM 很难完全熔化。D. S. Mehta 等^[64]通过实验对比了水平和垂直方向的管壳式相变储热单元的性能。在设定工况下,水平放置时完成一半 PCM 熔化所需的时间比竖直放置时少了 25%;而在凝固过程,两个结构未观察到明显差异。L. Kalapala 等^[65](竖直方向)研究了处于 0°、30°、60°、90° 倾角下的管壳式相变潜热单元的性能。结果表明,倾角对熔化过程有重要影响,而对凝固过程的影响则可忽略。储热单元水平放置时,内部 PCM 在上半部分完全熔化之前的熔化速率较高,而竖直放置时的总熔化时间较短。

综上所述,倾角对于 PCM 的熔化具有重要作用。但现有的大多数研究仅简单测试了几个特定角度下的 PCM 熔化特性,如 0°、45° 和 90°。同时,关于倾角的定义不甚相同,进而所得结论也存在冲突或矛盾。而且,由于相变储热单元在结构上的差异,导致加热面位置也不同,所以即使倾角定义相同,研究结果仍不具备可对比性。在后续的研究中,可从倾角影响液态 PCM 自然对流的本质出发,定义基于热流方向和重力方向的分析坐标,进而进行整体的系统研究。

3.2 主动式流动强化

主动式流动强化是较为新颖的 PCM 传热强化方法,新增的外作用场主要包括磁场、气泡和超声波等,除了提升相变储能器中 PCM 的传热速率外,在凝固时,还可有效克服一些无机类 PCM 的过冷及相分离等缺陷,应用前景广泛。

Fan Yubin 等^[66]提出了一种基于旋转磁场的相变材料熔化加速方法。分散在液体相变材料中的磁颗粒在旋转磁场的作用下作圆周运动,使液态 PCM 强制对流,从而加速热量的传递过程,相应的实验装置如图 12 所示。储热器主体由双层玻璃圆筒构成,内层为含磁颗粒的 PCM,外层为 HTF 流道。低温水浴为相变材料提供恒定的初始温度,高温水浴为相变材料熔化提供热量。圆筒的上下两侧采用低导热亚克力材料制成,并覆盖隔热层。在储热器上方同心固定旋转电机,通过传动杆带动永磁体绕储热器旋转。

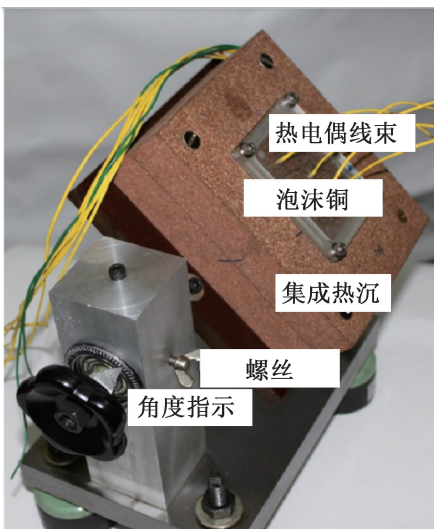


图 11 倾角影响 PCM 泡沫铜热沉传热能力实验装置^[58]
Fig.11 Experimental device for influencing heat transfer capacity of PCM by inclination angle^[58]

结果表明,在设定转速为 20 r/min、粒子质量分数为 1.0%、加热温度为 35 °C 条件下,可使总熔化时间缩短 22.9%。

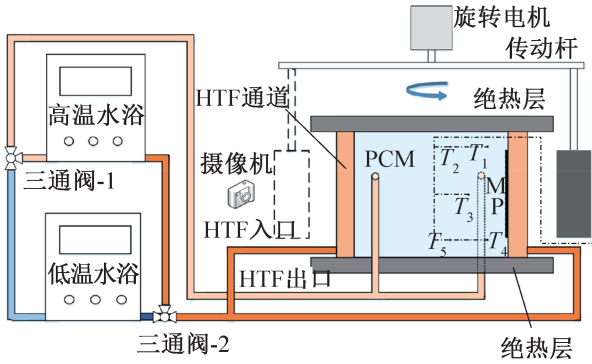


图 12 磁场强化相变储热器传热速率实验装置^[66]

Fig.12 Experimental device for enhancing the LHS heat transfer rate by rotating magnetic field^[66]

S. H. Choi 等^[67]采用气泡注入方法强化相变储热器的热性能。由于液态 PCM 与气泡存在密度差,气泡驱动流动可促进不同温度的液态 PCM 混合,从而延缓热分层的形成。同时,流速的增加也可增强热源与 PCM 之间的传热效果。实验装置如图 13 所示,压缩空气通过流量计和阀门控制空气流速。为了分析气泡驱动流动的效果,在相同的流动条件下,对有无气泡喷射进行了对比和评价。结果表明,在注入的压缩空气流量为 0.2、0.4、0.6 L/min 时,熔化时间分别减少 53%、40%、37%,平均储能率分别增加 218%、173%、159%。此外,气泡驱动流动不会在液体 PCM 内部和表面产生泡沫,也没有 PCM 飞溅或损失。

与外加磁场和注入气泡相比,超声波主要应用于相变蓄冷领域,已被验证能够很好地改善相变蓄冷材料的过冷和相分离问题,并提高材料的成核速率,促进结晶。甘伟等^[68]阐述了 3 种常见的超声波装置(外置式、内置式和壁式)及其特性,总结超声波对过冷度、二次结晶、成核速率、生长速率及稳定性等方面的影响,内置式的超声波强化实验装置^[69]如图 14 所示。所以,通过超声波方式解决过冷度高、蓄冷时间慢、稳定性差及成核慢等问题,在相变蓄冷领域具有很好的应用前景。

主动式流动强化方法对提升传热速率效果显著。但值得注意的是,在传热效果提升的同时,还伴随着外部功耗或成本的增加,在实际应用中需要实现基于经济性的平衡。此外,由于外加作用场所引起的流动属于强制对流,在后续研究中应使其与相变储能器存在的自然对流相互协同,才能最大化外加作用场的强

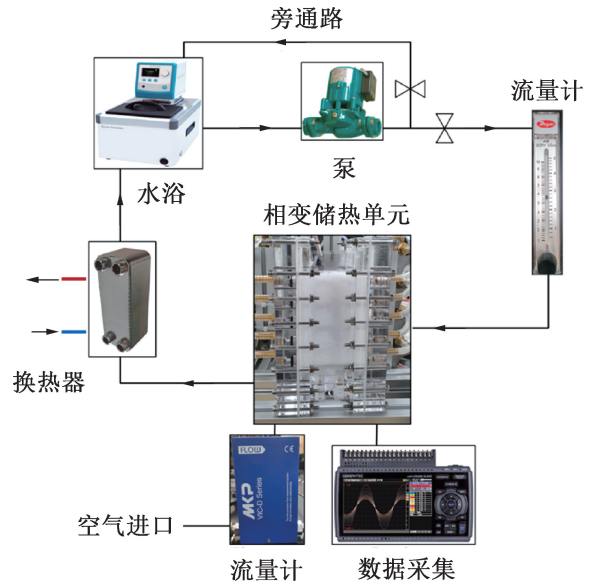


图 13 气泡强化相变储热器传热速率实验装置^[67]

Fig.13 Experimental device for enhancing the heat transfer rate of LHS system by bubble-driven flow^[67]

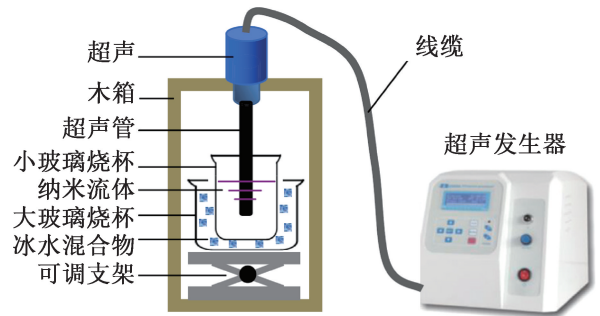


图 14 超声强化相变储热器传热速率实验装置^[69]

Fig.14 Experimental device for enhancing the heat transfer rate of LHS system by ultrasonic oscillation^[69]

化效果。

4 热源与 PCM 相对几何关系

基于前述相关研究,可归纳出三种适用于相变储热器的热源与热汇的相对几何关系,即扩张式、平行式和收缩式,如图 15 所示。相对几何关系为热源侧与热汇侧(PCM)的传热面积比值。基于三种几何关系的相变储热器结构均可在相关研究中发现,如图 16 所示。一般而言,在传热能力上:收缩式>平行式>扩张式,所以已有研究多是提出了新型的收缩式结构或是基于扩张式结构对热汇(PCM)进行强化。

当设计相变储热器时,应首先考虑收缩式传递方式,其次为平行式,最后为扩张式,因为三者对应的传热能力依次下降。确定热源与热汇的相对几何关系后,即可在给定驱动势差下,设计高效热通路,完成热

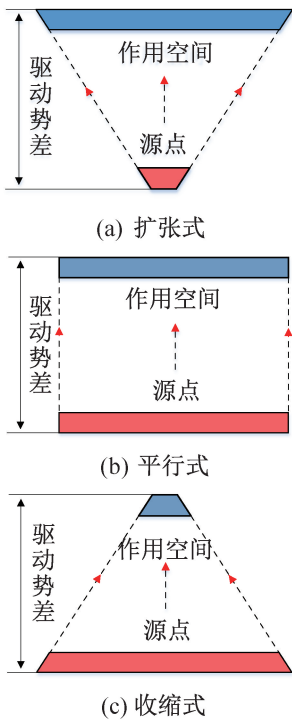


图 15 三种热源与热汇相对几何关系

Fig.15 Relative geometric relationship between three kinds of heat sources and heat sinks

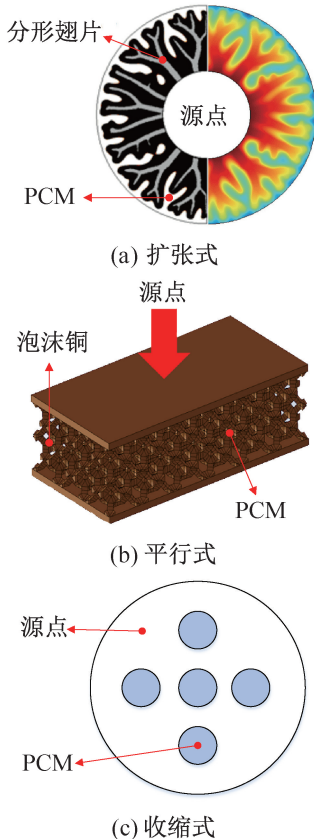


图 16 基于三种几何关系的相变储热器结构设计
Fig.16 LHS structure design based on three kinds of geometric relationship

量的传输。上述结论的具体验证案例可见文献[70]。基于“平行式”理念布置初始的热源与热汇的相对位置,同时以热管构建主热通路,使热量可以迅速从风道侧的高温气体均匀地传递至 PCM 大部分空间;同时,通过竖直翅片将热管进行连接,使之在空间上形成立体传热能力;此外,由于竖直翅片较大的加热面积,可使两翅片间形成较强的自然对流,进一步增强 PCM 的熔化速率。传热单元结构即可充分发挥自然对流对熔化的促进作用,又可形成较强的空间传热能力,最终获得高效相变储热器,实现了中试规模的空分纯化系统余热回收再利用,回收率达 52.7%,可使电加热器功耗降低约 17.59%。

5 结论

相变材料的低导热性是限制相变储热技术大规模应用的主要因素,因此,提升相变储热器的传热速率已成为当前的主要研究热点。为掌握相关强化方法的发展趋势,本文重点论述了组合传热强化技术、多级传热强化技术和液态 PCM 流动强化技术三种传热强化方法,得到结论如下:

1) 组合传热强化技术,在单一传热强化技术基础上发展而来,通常可以获得更佳的传热效果,但在已有研究中,相关组合一般只是随机性选取,需要进一步明晰遴选规则和组合的传热强化机理,充分发挥各组合元件的优势,实现导热强化和自然对流抑制的平衡。

2) 多级传热强化技术,在实验研究中,多种 PCM 主要基于任意选择并根据熔化温度进行简单线性排列;而理论研究多假定系统处于静态,即每一级的 PCM 质量相同并处于相变状态。但在实际应用中,不同子级 PCM 的储热和放热均为动态,因此同时优化 PCM 的相变温度和质量至关重要。

3) 液态 PCM 流动强化技术,被动式流动强化通过改变相变储热器的安装倾角即可获得较好的传热效果,应用潜力较大,但现有研究只简单测试特定角度下的 PCM 熔化特性,后续需要进一步深入研究;主动式流动强化具有较为显著的提升效果,但会伴随额外功耗或经济成本的增加。

最后,归纳了可指导相变储热器设计的热源与热汇相对几何关系,即扩张式、平行式和收缩式。同时,在未来推广相变储热技术时,需要注意到热量(或冷量)的存储是为某一工艺过程服务,设计方案需要从系统层面进行综合考量,使其具有高效性、经济性和可靠性;对于更加复杂多冷/热源的应用工况,应进行合理的流体匹配,基于热力学、系统论等知识,提出一

系列优化设计理论,使采用相变储热器发挥最佳作用。

参考文献

- [1] 《新时代的中国能源发展》白皮书[R]. 北京:中华人民共和国国务院, 2020. (The white paper on energy in China's new era[R]. Beijing: State Council of the People's Republic of China, 2020.)
- [2] 中国碳中和综合报告 2020[R]. 北京:能源基金会北京办事处, 2020. (Synthesis report 2020 on China's carbon neutrality[R]. Beijing: Energy Foundation Beijing Office, 2020.)
- [3] GE Zhiwei, LI Yongliang, LI Dacheng, et al. Thermal energy storage: Challenges and the role of particle technology [J]. *Particuology*, 2014, 15: 2-8.
- [4] 丁玉龙, 来小康, 陈海生. 储能技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018. (DING Yulong, LAI Xiaokang, CHEN Haisheng. Energy storage technology and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018.)
- [5] CABEZA L F, CASTELL A, BARRENECHE C, et al. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(3): 1675-1695.
- [6] SHARMA A, TYAGI V V, CHEN C R, et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(2): 318-345.
- [7] ABHAT A. Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials[J]. *Solar Energy*, 1983, 30(4): 313-332.
- [8] FAN Yubin, ZHANG Chunwei, JIANG Long, et al. Exploration on two-stage latent thermal energy storage for heat recovery in cryogenic air separation purification system [J]. *Energy*, 2022, 239: 122111.
- [9] ZHAO W, FRANCE D M, YU W, et al. Phase change material with graphite foam for applications in high-temperature latent heat storage systems of concentrated solar power plants[J]. *Renewable Energy*, 2014, 69: 134-146.
- [10] KONG Xiangfei, LU Shilei, HUANG Jingyu, et al. Experimental research on the use of phase change materials in perforated brick rooms for cooling storage[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 62: 597-604.
- [11] NEJMAN A, CIESLAK M, GAJDZICKI B, et al. Methods of PCM microcapsules application and the thermal properties of modified knitted fabric [J]. *Thermochimica Acta*, 2014, 589: 158-163.
- [12] WIRTZ R, SWANSON K, YAQUINTO M. Thermal energy storage thermal response model with application to thermal management of high power-density hand-held electronics [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2012, 134(1): 011002.
- [13] RAO Zhonghao, WANG Qingchao, HUANG Congliang. Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled battery thermal management system[J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 659-669.
- [14] 金云飞, 武卫东, 伏舜宇, 等. 低温冷链物流用相变材料的优化及应用[J]. *制冷学报*, 2021, 42(6): 106-113. (JIN Yunfei, WU Weidong, FU Shunyu, et al. Optimization and application of phase change materials for low-temperature cold chain logistics[J]. *Journal of Refrigeration*, 2021, 42(6): 106-113.)
- [15] HORBANIU B, POPESCU A, DUMITRAȘCU G. The correlation between the number of fins and the discharge time for a finned heat pipe latent heat storage system[J]. *Renewable Energy*, 1996, 9(1-4): 605-608.
- [16] LOHRASBI S, MIRY S Z, GORJI-BANDPY M, et al. Performance enhancement of finned heat pipe assisted latent heat thermal energy storage system in the presence of nano-enhanced H₂O as phase change material[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(10): 6526-6546.
- [17] LOHRASBI S, GORJI-BANDPY M, GANJI D D. Thermal penetration depth enhancement in latent heat thermal energy storage system in the presence of heat pipe based on both charging and discharging processes[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 148: 646-667.
- [18] TIARI S, QIU S. Three-dimensional simulation of high temperature latent heat thermal energy storage system assisted by finned heat pipes[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 105: 260-271.
- [19] LOHRASBI S, SHEIKHOLESAMI M, GANJI D D. Discharging process expedition of NEPCM in fin-assisted Latent heat thermal energy storage system[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, 221: 833-841.
- [20] MAHDI J M, NSOFOR E C. Melting enhancement in triplex-tube latent thermal energy storage system using nanoparticles-fins combination[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 109: 417-427.
- [21] PARSAZADEH M, DUAN X. Numerical study on the effects of fins and nanoparticles in a shell and tube phase change thermal energy storage unit [J]. *Applied Energy*, 2018, 216: 142-156.
- [22] MAHDAVI M, TIARI S, PAWAR V. Heat transfer analysis of a low-temperature heat pipe-assisted latent heat thermal energy storage system with nano-enhanced PCM [C]// Proceedings of ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: American Society of Mechanical Engineers,

- 2019.
- [23] ZHU Feng, ZHANG Chuan, GONG Xiaolu. Numerical analysis on the energy storage efficiency of phase change material embedded in finned metal foam with graded porosity [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 123: 256–265.
- [24] SRIVATSA P V S S, BABY R, BALAJI C. Numerical investigation of PCM based heat sinks with embedded metal foam/crossed plate fins[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2014, 66(10): 1131–1153.
- [25] XIE Yongqi, SONG Jun, CHI Pengtao, et al. Performance enhancement of phase change thermal energy storage unit using fin and copper foam[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 260/261: 137–141.
- [26] FENG Shangsheng, SHI Meng, LI Yifei, et al. Pore-scale and volume-averaged numerical simulations of melting phase change heat transfer in finned metal foam[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 90: 838–847.
- [27] NITHYANANDAM K, PITCHUMANI R. Computational studies on metal foam and heat pipe enhanced latent thermal energy storage[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2014, 136(5): 051503.
- [28] REN Qinlong, MENG Fanlong, GUO Penghua. A comparative study of PCM melting process in a heat pipe-assisted LHTES unit enhanced with nanoparticles and metal foams by immersed boundary-lattice Boltzmann method at pore-scale[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 121: 1214–1228.
- [29] HOSSAIN R, MAHMUD S, DUTTA A, et al. Energy storage system based on nanoparticle-enhanced phase change material inside porous medium[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, 91: 49–58.
- [30] MAHDI J M, NSOFOR E C. Solidification enhancement in a triplex-tube latent heat energy storage system using nanoparticles-metal foam combination[J]. *Energy*, 2017, 126: 501–512.
- [31] MAHDI J M, NSOFOR E C. Melting enhancement in triplex-tube latent heat energy storage system using nanoparticles-metal foam combination[J]. *Applied Energy*, 2017, 191: 22–34.
- [32] ZHANG Chunwei, YU Meng, FAN Yubin, et al. Numerical study on heat transfer enhancement of PCM using three combined methods based on heat pipe[J]. *Energy*, 2020, 195: 116809.
- [33] ZHANG Chunwei, ZHANG Xuejun, QIU Limin, et al. Multi-objective optimization of a latent thermal energy storage unit with compound enhancement method[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 181: 115736.
- [34] GONG Z, MUJUMDAR A S. A new solar receiver thermal store for space-based activities using multiple composite phase-change materials[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1995, 117(3): 215–220.
- [35] WANG Jianfeng, CHEN Guangming, JIANG Haobo. Theoretical study on a novel phase change process[J]. *International Journal of Energy Research*, 1999, 23(4): 287–294.
- [36] WANG Jianfeng, OUYANG Yingxiu, CHEN Guangming. Experimental study on charging processes of a cylindrical heat storage capsule employing multiple-phase-change materials [J]. *International Journal of Energy Research*, 2001, 25(5): 439–447.
- [37] WANG Jianfeng, CHEN Guangming, ZHENG Fei. Study on phase change temperature distributions of composite PCMs in thermal energy storage systems [J]. *International Journal of Energy Research*, 1999, 23(4): 277–285.
- [38] SHAIKH S, LAFDI K. Effect of multiple phase change materials (PCMs) slab configurations on thermal energy storage[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(15/16): 2103–2117.
- [39] ADINE H A, EL QARNIA H. Numerical analysis of the thermal behaviour of a shell-and-tube heat storage unit using phase change materials [J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2009, 33(4): 2132–2144.
- [40] WANG Peilun, WANG Xiang, HUANG Yun, et al. Thermal energy charging behaviour of a heat exchange device with a zigzag plate configuration containing multi-phase-change-materials (m-PCMs) [J]. *Applied Energy*, 2015, 142: 328–336.
- [41] EZRA M, KOZAK Y, DUBOVSKY V, et al. Analysis and optimization of melting temperature span for a multiple-PCM latent heat thermal energy storage unit [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 93: 315–329.
- [42] 郭绍振, 肖光明, 张楠, 等. 基于复合相变材料的梯级组合蓄热特性研究[J]. *制冷学报*, 2020, 41(3): 140–146. (GUO Shaozhen, XIAO Guangming, ZHANG Nan, et al. Study on the heat storage characteristics of cascade heat storage based on composite phase change material[J]. *Journal of Refrigeration*, 2020, 41(3): 140–146.)
- [43] EISAPOUR M, EISAPOUR A H, HOSSEINI M J, et al. Exergy and energy analysis of wavy tubes photovoltaic-thermal systems using microencapsulated PCM nano-slurry coolant fluid[J]. *Applied Energy*, 2020, 266: 114849.
- [44] LI Yaqi, HE Yaling, WANG Zhifeng, et al. Exergy analysis of two phase change materials storage system for solar thermal power with finite-time thermodynamics [J]. *Renewable Energy*, 2012, 39(1): 447–454.
- [45] XU H J, ZHAO C Y. Analytical considerations on optimi-

- zation of cascaded heat transfer process for thermal storage system with principles of thermodynamics [J]. *Renewable Energy*, 2019, 132: 826–845.
- [46] TAO Y B, HE Y L, LIU Y K, et al. Performance optimization of two-stage latent heat storage unit based on entransy theory [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 77: 695–703.
- [47] BJURSTRÖM H, CARLSSON B. An exergy analysis of sensible and latent heat storage [J]. *Journal of Heat Recovery Systems*, 1985, 5(3): 233–250.
- [48] LIM J S, BEJAN A, KIM J H. Thermodynamic optimization of phase-change energy storage using two or more materials [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 1992, 114(1): 84–90.
- [49] ACEVES-SABORIO S, NAKAMURA H, REISTAD G M. Optimum efficiencies and phase change temperatures in latent heat storage systems [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 1994, 116(1): 79–86.
- [50] KOUSKSOU T, STRUB F, LASVIGNOTTES J C, et al. Second law analysis of latent thermal storage for solar system [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007, 91(14): 1275–1281.
- [51] CHENG Xiwen, ZHAI Xiaoqiang. Thermal performance analysis and optimization of a cascaded packed bed cool thermal energy storage unit using multiple phase change materials [J]. *Applied Energy*, 2018, 215: 566–576.
- [52] XU H J, ZHAO C Y. Thermal performance of cascaded thermal storage with phase-change materials (PCMs). Part I: Steady cases [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 106: 932–944.
- [53] ZHANG Chunwei, ZHANG Xuejun, QIU Limin, et al. Thermodynamic analysis and improvement of cascaded latent heat storage system using temperature-enthalpy diagram [J]. *Energy*, 2021, 219: 119573.
- [54] ZHANG Chunwei, ZHANG Xuejun, QIU Limin, et al. Thermodynamic investigation of cascaded latent heat storage system based on a dynamic heat transfer model and DE algorithm [J]. *Energy*, 2020, 211: 118578.
- [55] 张涛, 余建祖, 高红霞. 自然对流对泡沫金属复合相变储能的影响实验研究 [J]. *制冷学报*, 2009, 30(1): 1–6. (ZHANG Tao, YU Jianzu, GAO Hongxia. Experiment on thermal conductivity enhancement for PCM embedded in metal foam [J]. *Journal of Refrigeration*, 2009, 30(1): 1–6.)
- [56] BEJAN A. *Convection heat transfer* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [57] SHARIFI N, ROBAK C W, BERGMAN T L, et al. Three-dimensional PCM melting in a vertical cylindrical enclosure including the effects of tilting [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 65: 798–806.
- [58] BABY R, BALAJI C. Experimental investigations on thermal performance enhancement and effect of orientation on porous matrix filled PCM based heat sink [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2013, 46: 27–30.
- [59] GROULX D, BIWOLE P H. Solar PV passive temperature control using phase change materials [C] // *Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference*. Kyoto, Japan: Begel House Inc., 2014.
- [60] KAMKARI B, SHOKOUHMAND H, BRUNO F. Experimental investigation of the effect of inclination angle on convection-driven melting of phase change material in a rectangular enclosure [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 72: 186–200.
- [61] SEDDEGH S, WANG X, HENDERSON A D. A comparative study of thermal behaviour of a horizontal and vertical shell-and-tube energy storage using phase change materials [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 93: 348–358.
- [62] PAHAMLI Y, HOSSEINI M J, RANJBAR A A, et al. Effect of nanoparticle dispersion and inclination angle on melting of PCM in a shell and tube heat exchanger [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2017, 81: 316–334.
- [63] AL SIYABI I, KHANNA S, MALLICK T, et al. An experimental and numerical study on the effect of inclination angle of phase change materials thermal energy storage system [J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 23: 57–68.
- [64] MEHTA D S, SOLANKI K, RATHOD M K, et al. Thermal performance of shell and tube latent heat storage unit: Comparative assessment of horizontal and vertical orientation [J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 23: 344–362.
- [65] KALAPALA L, DEVANURI J K. Energy and exergy analyses of latent heat storage unit positioned at different orientations – An experimental study [J]. *Energy*, 2020, 194: 116924.
- [66] FAN Yubin, YU Meng, ZHANG Chunwei, et al. Melting performance enhancement of phase change material with magnetic particles under rotating magnetic field [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 38: 102540.
- [67] CHOI S H, SOHN D K, KO H S. Performance enhancement of latent heat thermal energy storage by bubble-driven flow [J]. *Applied Energy*, 2021, 302: 117520.
- [68] 甘伟, 章学来, 徐笑锋. 超声波优化相变蓄冷材料的研究进展 [J]. *包装工程*, 2021, 42(1): 46–54. (GAN Wei, ZHANG Xuelai, XU Xiaofeng. Research progress on optimization of phase change cool storage materials by ultrasonic [J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(1): 46–54.)

- [69] LIU Yudong, LI Xin, HU Pengfei, et al. Study on the supercooling degree and nucleation behavior of water-based graphene oxide nanofluids PCM[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 50: 80–86.
- [70] 张春伟. 应用于空分纯化系统的多级相变储热方法及其传热强化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021. (ZHANG Chunwei. Investigation on multi-stage latent heat storage method and its heat transfer enhancement applied to purification system of air separation plant[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.)

通信作者简介

张学军, 男, 教授, 浙江大学制冷与低温研究所, 0571-87952446, E-mail: xuejzhang@zju.edu.cn。研究方向: 制冷空调、空分系统。

About the corresponding author

Zhang Xuejun, male, professor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, + 86 571-87952446, E-mail: xuejzhang@zju.edu.cn. Research fields: refrigeration and air conditioner system, air separation system.