



相变蓄热复合传热强化技术综述

赵 兰¹, 王国珍²

(¹南京工业大学浦江学院, 江苏 南京 211122; ²中国工商银行数据中心 (上海),
上海 201815)

摘 要: 相变材料(PCM)通过在相变过程中吸热或放热实现热能的存储与释放。相变材料在热能存储和热管理领域凭借其相变区间温度稳定、储能密度大受到了广泛认可。然而,相变材料普遍存在热导率低的问题,需要结合传热强化技术进行改善。在采用某一种强化技术的基础上,两种或多种传热强化技术相组合的“复合强化技术”成为目前传热强化与相变蓄热性能改善的研究热点。本文通过对相关文献的分析,综述了目前复合传热强化技术的研究进展,包括以翅片为基础,分别结合热管、纳米颗粒、多孔材料和梯级蓄热,以及多孔材料结合热管、纳米材料和梯级蓄热等多种复合方式。分析表明:通过将热管与翅片或多孔材料混合使用,可以达到传热强化最佳效果;纳米颗粒与翅片或多孔材料的混合使用比同等条件下单独使用纳米颗粒更有效;采用梯级蓄热与翅片或多孔材料相结合相较于单独采用梯级蓄热具有更快的蓄/放热速率和更加均匀的换热流体出口温度。建议对其他可能的复合传热增强技术进行深入研究,并通过实验验证、优化蓄热系统的结构设计和具体参数探讨对蓄热性能的影响。

关键词: 相变蓄热; 复合传热强化; 翅片; 纳米材料; 热管; 多孔材料

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0300

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2022) 11-3534-14

Research progress on composite heat transfer enhancement technology of phase change heat storage system

ZHAO Lan¹, WANG Guozhen²

(¹Nanjing Tech University Pujiang Institute, Nanjing 211122, Jiangsu, China; ²Industrial and Commercial Bank of China Data Center (Shanghai), Shanghai 201815, China)

Abstract: Phase change materials (PCM) can realize energy storage through absorbing and releasing latent heat during phase change processes. PCM is extensively known in thermal energy storage and management because of its stable phase change temperature and high energy storage density. Nevertheless, it usually suffers from low thermal conductivity, which needs to be aggregated with heat transfer improvement technologies. Based on adopting only one particular improvement technology, the “composite heat transfer enhancement technology,” which combines more than one heat transfer enhancement technology, has become a research hotspot of heat transfer enhancement and phase change heat-storage performance improvement. The major research in composite heat transfer technology is summarized in this research, covering studies based on fins or porous material, heat pipe joined independently, nanomaterials, and cascade heat storage. It was discovered that the best results were attained by combining heat pipes with fins or porous material. Under the same conditions,

收稿日期: 2022-06-01; 修改稿日期: 2022-07-09。

第一作者及通讯联系人: 赵兰 (1982—), 女, 工程师, 研究方向为

空调制冷、相变材料, E-mail: 94386994@qq.com。

combining nanoparticles with fins or porous material is more efficient than utilizing nanomaterials alone. Compared with single cascade phase change, cascade PCM combined with fins or foam metal has faster heat storage and release rate and a more uniform fluid outlet temperature. Further studies are proposed to explore more composite improvement techniques. The influence of structural design or detail parameters needs additional experimental confirmation and enhancement, which can optimize the performance of PCM-based thermal storage systems.

Keywords: phase change heat storage; composite heat transfer enhancement; fins; nanomaterials; heat pipe; porous material

随着国民经济的快速发展,我国社会总能耗逐年上升。煤炭、石油等化石燃料的大规模开发利用导致的能源紧缺,能源利用率低以及能源过度消耗引发的环境问题,成为全社会面临的亟需解决的能源困境。我国 CO₂ 的排放目标将在 2030 年实现碳达峰和 2060 年实现碳中和。为解决上述能源问题,开发利用清洁可再生资源面临前所未有的机遇和挑战。目前,可再生能源的开发中,太阳能和工业余热回收增速较快,两者都需要解决热利用过程中热能分散、能源连续性和稳定性差的问题。热能存储技术可以将间断的、不连贯的热能转变成为持续输出的稳定能源,可以提升能源的回收利用效率,利用工业余热和太阳能、风能等新能源,解决建筑节能、电子设备散热、农业谷物干燥等问题^[1]。以相变材料(PCM)为蓄能材料的高效蓄热系统在热能存储方面具有巨大潜力,部分 PCM 蓄热装置已投入大规模工业使用。继续深化研究,提高相变蓄热装置的传热、蓄热性能具有重要意义。

1 相变蓄热系统性能增强方式

任意传热过程的基本传热方程可表示为 $Q = KF\Delta t$, 其中 Q 为蓄热/放热功率, W; K 为冷热介质之间的热导率, W/(m²·K); F 为传热面积, m²; Δt 为换热温差, °C。

根据基本传热方程可知,与传热率正相关的 3 个关键参数为 K 、 F 和 Δt 。当前大部分 PCM 热导率较低,如石蜡、酸或醇类的热导率约为 0.3 W/(m²·K),无机盐类热导率约为 0.5 W/(m²·K)^[2],极大限制了相变蓄热装置的性能。相变传热强化技术研究的主要任务是通过提高上述 3 个关键参数,实现相变材料与换热流体(HTF)之间的传热强化,改善蓄热装置的蓄/放热功率。PCM 蓄热系统有 3 种主要的传热增强方法(图 1): ①增强 PCM 和 HTF 之间的换热

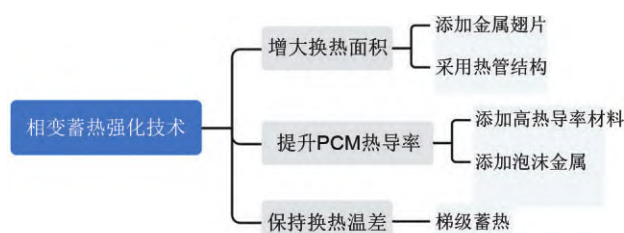


图1 相变蓄热强化技术

Fig. 1 Phase change heat storage enhancement technology

面积,通常是在 PCM 和 HTF 之间添加翅片或热管;②提高 PCM 的热导率,目前研究较多的是在 PCM 中添加高热导率的多孔载体材料和纳米粒子;③增大换热温差,常用的是采用多个不同相变温度的 PCM 实现梯级蓄热,可以保持流体流动方向上 PCMs 和 HTF 之间相对较大的换热温差,从而提高装置的蓄/放热效率和焓效率。

英国伯明翰大学的 Li 等^[3]从中高温(200~1000 °C)熔融盐类 PCM 的蓄能机理、热物性参数入手,介绍了近期广泛研究的熔融盐类 PCM 的种类,并综述了壳管式蓄能装置 HTF 侧和 PCM 侧的传热强化方法。Merlin 等^[4]简述了 PCM 蓄热性能的各种增强方法,如改善热交换表面,将 PCM 封装,添加高热导率的粒子,制作石墨粉末或膨胀天然石墨(ENG)与 PCM 的复合材料等,并采用实验和数值模拟方法对 5 种管式换热器增强方法进行了总传热系数的对比研究。结果表明,在考虑 PCM 与换热界面压力和热阻影响的前提下,嵌入到 ENG 矩阵的 PCM 复合材料与铜管换热达到了最高的总传热系数[3000 W/(m²·K)]。Tao 和 He^[5]两位学者综述了近年来潜热储存(LHE)中 PCM 和传热性能强化方法,主要包括以下几方面强化传热技术:多孔材料/纳米复合 PCM、翅片管、封装 PCM 和级联式 LES,并对未来相关强化传热技术的研究提出了一

些建议。金光等^[6]综述了从多孔材料强化传热、利用翅片和热管优化储能设备结构、翅片耦合热管为主的联合强化传热技术3个方面介绍了国内外近年来的研究成果。林文珠等^[7]综述对比了分别添加膨胀石墨、纳米材料、泡沫金属等复合材料的导热性能,同时介绍了功能热流体传热强化以及不同类型储热器的传热强化方式。

当前相变蓄热强化换热的综述文献中,主要针对强化传热技术中的一种,即专注于提高换热面积、PCM热导率或保持换热温差中的某一方面,相变蓄热装置传热性能提升能力有限。复合强化传热技术就是将两种或两种以上的强化传热技术相结合,多维度改善相变蓄热系统的整体传热性能^[8-9],也是目前许多研究者尝试的另一种新型有效的方法。复合传热强化技术能够发挥各种传热强化技术的特长,与单一的强化方式相比,在提高热导率和蓄/放热速率方面具有明显优势。本文在研究分析相关文献后,将复合传热增强技术按照以翅片为基础和以多孔材料为基础进行了分类,全面介绍了复合传热强化技术国内外的最新研究进展和显著成果,并针对部分复合技术提出了研究方向的建议。

2 翅片式相变蓄热复合强化技术

通过添加不同类型的翅片改善相变蓄热系统性能的研究可以追溯到几十年前。目前已研发成功的翅片形式多种多样,有径向翅片、纵向翅片、螺旋翅片、雪花形、矩形翅片、网状翅片等^[10-12]。与其他强化方法相比,翅片可以增加蓄热器的换热面积,并且加工制造容易,成本低、寿命长。不同的翅片结构(翅片的形状),同一翅片不同的结构参数(翅片分支长度、厚度、高度以及分支夹角)等因素都会对相变材料的相变过程产生影响^[6,13]。在翅片强化传热的基础上,可以联合热管、纳米粒子、多孔材料、梯级蓄热等强化方式,增大换热面积的同时,提高PCM和HTF之间的传热系数,增强PCM内部的传热均匀性。

2.1 翅片和热管

热管通过蒸发器和冷凝器中工质的蒸发和冷凝过程来充当PCM和HTF的热载体。在制冷和供热、能量回收和散热方面,热管的应用可提高PCM熔化或凝固过程的速度。通过将翅片和热管相结合作为PCM和HTF之间的“热桥”是目前广泛应用的

复合强化传热技术之一。

叶三宝等^[14]以58℃石蜡作为PCM设计了一套平板热管两侧添加纵向翅片(体积比17%)的新型相变蓄热器。新型平板热管体积小,热运输能力明显优于传统的圆形热管,平板热管的传热面与翅片的基面紧密贴合,传热面积较大,传热效率更高,在蓄/放热过程中很好地发挥了强化传热元件的作用。蓄热过程中,传热流体温度越高,PCM的熔化速率也越大;放热过程中,相同的流体温度下,随着流体流速的增大,蓄热器的放热速率逐渐增加。

Essa等^[15]以石蜡为PCM,对带螺旋翅片的热管型太阳能集热系统进行了实验研究(图2),对比了不带螺旋的常规翅片和螺旋翅片两种集热器在不同水流量下的集热性能。实验结果表明,螺旋翅片集热器与常规翅片集热器相比具有更好的温度均匀性。在相同流量下,螺旋翅片热管和常规翅片热管的最大温差分别为4℃和12.25℃。当流量为0.5 L/min和0.665 L/min时,螺旋翅片的蓄热效率分别比常规翅片提高15%和13.6%。此外,螺旋翅片系统比常规翅片系统的液相转变延迟30~60 min。

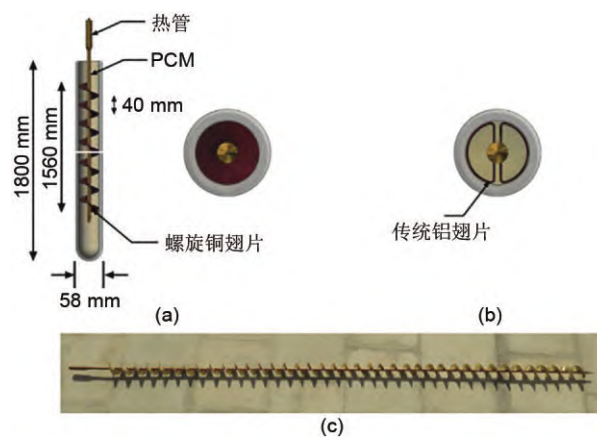


图2 螺旋翅片+热管
Fig. 2 Spiral fin + heat pipe

Tiari等^[16]通过数值模拟探究了不同热管间距、翅片长度、翅片数量以及自然对流等影响因素对“翅片+热管型”相变蓄热装置的热响应(图3)。研究表明,自然对流对PCM的熔化过程影响较大,凝固模式下因为自然对流被抑制而没有发挥显著作用;增加热管数量(减少热管间距)导致熔化速率和基壁温度降低。在他们的另一项研究中发现^[17],凝固过程中减小热管间距会导致更高的凝固速率和更高的容器底壁温度;增加翅片长度会导致

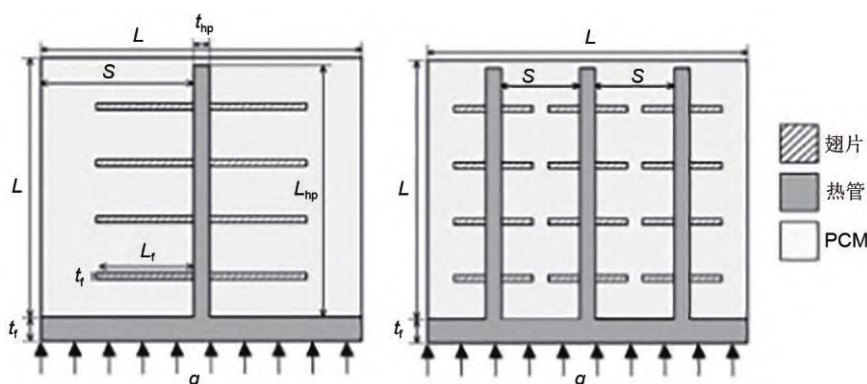


图3 环形翅片+圆热管

Fig. 3 Ring fin + round heat pipe

PCM 内的温差减小, 提供更均匀的温度分布, 而翅片的数量对装置蓄热性能没有显著影响。

Lohrasbi 等^[18]对翅片+热管式 PCM 潜热蓄热系统的放热过程进行了研究。该研究利用响应面法对比了翅片系统在连接到热管前后几何参数的影响(图 4)。结果表明, V 形翅片的几何参数(分支的长度、厚度以及分支夹角等)对热管的热量传递有显著影响。纵向和径向 V 形翅片与热管的复合结构放热速率比无翅片热管的热存储单元(LHTES)分别提高了 4.214、3.309 和 3.582 倍, 发现浸入式翅片热管优于其他常规方法。

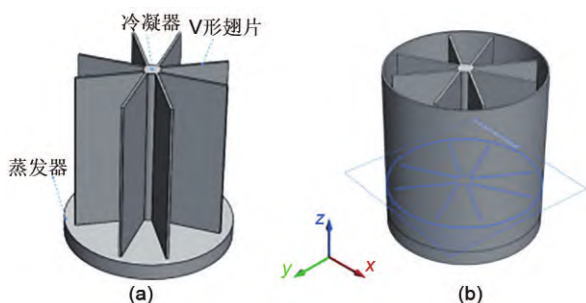


图 4 V 形翅片+圆热管

Fig. 4 V shaped fin + round heat pipe

综上所述, 在热管与翅片结合的复合传热强化技术中, 螺旋翅片的传热性能优于常规翅片; 改变翅片或热管的几何尺寸, 如增加翅片长度, 设置 V 形翅片可有效提高传热效果; 减少热管间距会导致熔化速率和基壁温度降低, 凝固速率和容器底壁温度增高。通过大量实验验证, 选择最优化的翅片和热管的类型、尺寸不仅可以改善传热性能, 还可以降低装置的制造成本。

2.2 翅片和纳米粒子

在 PCM 中添加高热导率的纳米粒子也是对蓄热材料进行传热强化的方式之一。常见的纳米粒子有石墨烯纳米片、碳纳米管、金属纳米粒子等, 添加纳米粒子的复合 PCM 热导率可达到纯 PCM 的几倍甚至十几倍。翅片和纳米粒子相结合的复合传热强化可使翅片的结构优势和纳米粒子的材料优势得到更好发挥。

肖玉麒等^[19]以熔点接近 50 °C 的十六醇为 PCM, 选用外径 8~15 nm, 长度 0.5~2.0 μm 的多壁碳纳米管为填料, 研究了带有热沉翅片式纳米复合 PCM 的电子热管理系统(图 5)。测试了填料质量分数分别为 0.3%、1% 和 3% 时的热导率。添加量为 1% 和 3% 时, 复合相变材料在固态和液态的热导率均有所提高(最高达 40.6%)。但是添加填料后, PCM 的液态有效黏度的急剧增加极大削弱了熔化过程中的自然对流效应, 甚至抵消了热导率提升所带来的强化效果, 热沉性能随着碳纳米管的添

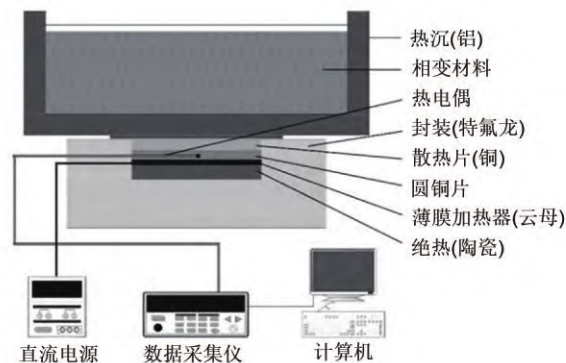


图 5 相变储能式热沉实验装置

Fig. 5 Schematic diagram of phase change energy storage heat sink experimental device

加量提升而削弱。实验验证了自然对流效应和热沉对于传热强化的重要性。

UL Hasnain 等^[20]通过数值模拟和对比实验的方法,采用树枝状翅片和纳米粒子提高相变热能存储(LHTES)单元中 PCM 的熔化速率(图6)。结果表明:在纯 PCM 情况下,全直、单分支和双分支翅片设计通过有效的热传递增强熔化,与 Y 向三翅片基本情况相比,分别节省 22.9%、35.4% 和 45.9% 的时间,且三者的储能容量以相同的顺序增加。以最优化的双分支翅片设计为基础,有效融合了 Al_2O_3 纳米粒子对熔化性能的影响。与纯 PCM 相比,在 PCM 中添加 1%、5% 和 10% 体积的纳米颗粒分别节省 11.5%、19.2% 和 26.8% 的时间。但由于纳米粒子体积占比增加,热能存储能力随之降低。

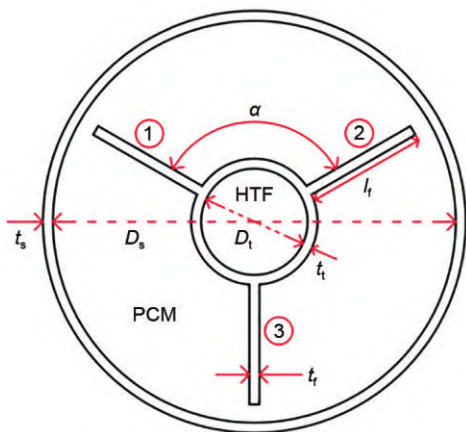


图6 树形翅片+ Al_2O_3 粒子
Fig. 6 Tree-shaped fins + Al_2O_3 particles

Mahdi 等^[21]研究了在翅片和纳米粒子的三联管式换热器中,等温时用 HTF 在 363 K、368 K 和 373 K 的温度下在三重管内的两个壁上加热,翅片尺寸和纳米粒子体积分数对固-液界面演变、等温线分布和熔化过程中液体分数的时间分布的影响(图7)。文中提出,使用翅片和纳米粒子的复合强化比单独使用纳米粒子更有效。此外,HTF 温度的升高有助于 PCM 熔化时间的减少,增强了纳米粒子-翅片组合的潜力。

Elarem 等^[22]提出并研究了一种带有翅片的 Nano-PCM(纳米-PCM)新型真空管太阳能集热器(ETSC)(图8)。通过数值模拟的方法研究了在石蜡基 PCM 翅片集热器中添加铜(Cu)纳米粒子对系统性能的影响,并且分析了装置内石蜡的固液相变特

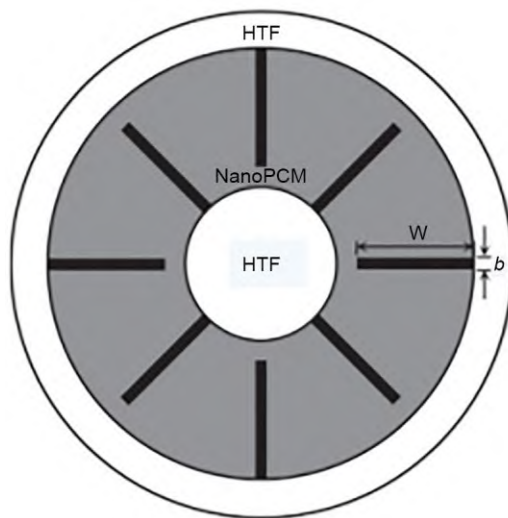


图7 翅片-纳米粒子三联管
Fig. 7 Fin-nanoparticle triplet

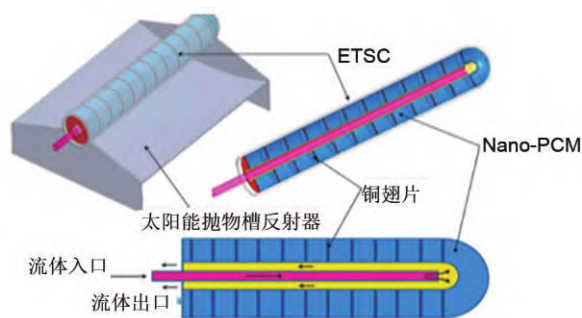


图8 纳米-翅片式太阳能蓄热器
Fig. 8 Nano-fin solar thermal accumulator

性,对翅片参数(即翅片厚度和翅片间距)进行了优化分析。结果表明,添加翅片对 ETSC 中石蜡的相变传热有很大的影响,且随着翅片的厚度变薄,PCM 熔化得更快。发现向 PCM 中添加 1% 的 Cu 是 HTF 出口温度增加 2 K 时的最佳质量浓度。

综上所述,采用翅片与铜、 Al_2O_3 等纳米粒子的复合强化传热方式比单独在 PCM 中添加纳米粒子表现出更好的传热特性。采用不同类型的翅片结构或者不同厚度的翅片,蓄热速率可得到不同程度提高,最高可提高 40% 以上(如双分支翅片设计)。由于材料的物理特性不同,还需对纳米粒子的选择、翅片的结构形式与 PCM 的耦合进行大量的实验验证。

2.3 翅片和梯级蓄热

蓄热系统使用多个 PCM 的目的是在蓄/放热循环期间保持 HTF 和每种 PCM 之间几乎恒定的温差,从而提高 PCM 和 HTF 之间的传热性能;将翅片和梯级蓄热相结合在扩大换热面积的同时也能保

持较大的换热温差,从而达到强化换热的目的。

王晨羽^[23]采用数值模拟的方法将环形翅片和三级相变材料相结合进行装置的蓄/放热性能探究,研究了三级蓄热装置中 PCM 不同的组分比和不同的翅片参数(长度、高度和厚度)对梯级 PCM 蓄/放热过程的影响。结果表明:增大翅片高度和厚度,缩小翅片间距是减少换热器蓄热时间的有效途径,其中翅片高度和间距对装置传热效率的影响是主要影响因素。PCM 组分比为 3:2:1 时梯级相变储能换热装置在蓄热时所需的时间最短。

Sodhi 等^[24]建立了一个垂直管壳式潜热蓄热系统的数值模型(图 9)。开发的模型由 3 块 PCM 组成,熔点温度(T_m)分别为 360 °C、335.8 °C 和 305.4 °C。最初采用 3 个 PCM 块中翅片的非均匀分布来研究单个 PCM 系统($T_m=335.8$ °C)的性能。通过改变基于单 PCM 系统计算的 Stefan 数(St_{ref} 值),分析了入口传热流体温度对单 PCM 和多 PCM(m-PCM)系统的充放热性能的影响。在 St_{ref} 值为 0.5、1、1.5 和 2 时, m-PCM 系统的蓄/放热时间与 St_{ref} 的单个 PCM 系统相似或更少,但是 m-PCM 系统对所有单块的蓄/放热比功率提高了 21%~25%。通过采用非均匀翅分布和长度比优化的 m-PCM 相结合的复合强化技术,该系统蓄/放热时间分别比单个 PCM 系统减少 30% 和 9%。

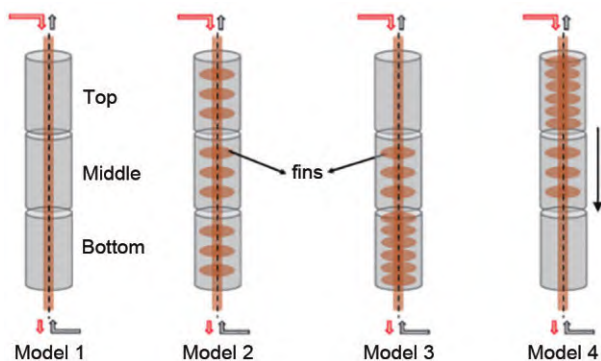


图 9 环形翅片+梯级蓄热

Fig. 9 Ring fin + cascade heat storage

Xu 等^[25]选择石蜡(RT42、RT50 和 RT60)作为 PCM,对水平管壳式相变储能装置中 3 层 PCM 的熔化性能进行了数值模拟研究(图 10)。为了加速传热,装置内加设金属翅片,并且创新性地提出了一种综合储能密度评价(CSDE)准则来评价 LTES 单元的熔化性能。与无翅片(Model 1)相比,3 层 PCM

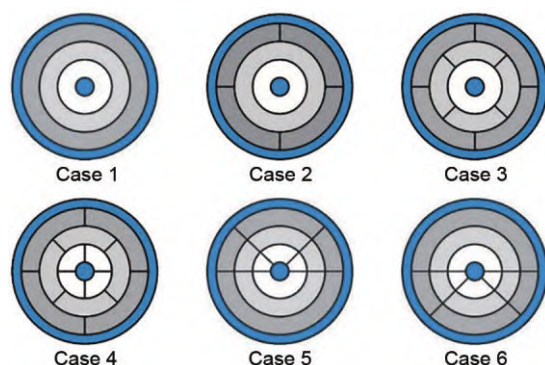


图 10 翅片三套管式梯级蓄热

Fig. 10 Finned three-tube cascade heat storage

中逐渐添加翅片可缩短 55.3% 熔化时间。

Sefidan 等^[26]通过数值研究评估了翅片三套管中双层 PCM 的传热和凝固特性、相变周期和温度分布(图 11)。讨论了两种不同 PCM 的可能排列以及 PCM 厚度、翅片尺寸和传热流体温度对换热效果的影响。显示结果为温度、液体分数、流函数和速度大小等值线的形式以及它们在冷冻时间内的变化。研究发现,较大的 H 增强了翅片对 B 部分散热的影响,而对 A 部分产生负面影响。对于较低的 H , A 部分的平均温度逐渐降低,反之较高的 H 导致 B 段的平均温度降低。

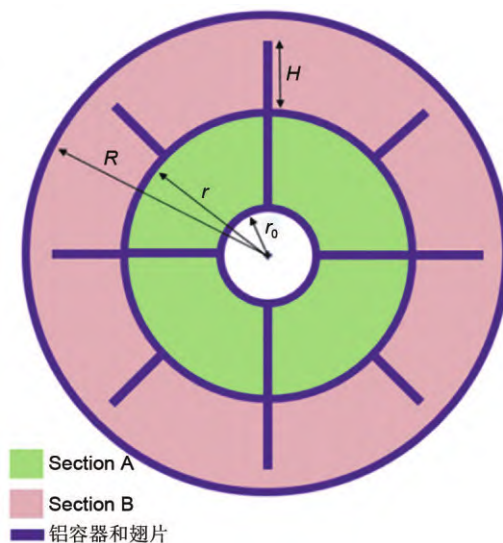


图 11 翅片三套管+2层梯级蓄热

Fig. 11 Finned triple tube + 2-layer cascade heat storage

Chiu 等^[27]通过数值模拟的方法进行了两种相变蓄热装置的性能研究。在浸没式翅片管换热器设计中,将单级 PCM 的蓄/放热速率与多级 PCM 进行

比较(图 12)。结果表明:在全蓄/放热模式下,多级 PCM 的热性能与均质单级 PCM 存储单元相比, LHTES 在蓄/放热速率方面可提高 10%~40%。这是由于多级 LHTES 能够在蓄/放热过程中为传热过程保持较高的驱动温差。然而,在半蓄/放热循环模式下,多级相变存储器的额定热功率性能在熔化过程中向单级相变存储器的热功率性能收敛,从而降低了多级相变存储器的增强效果。

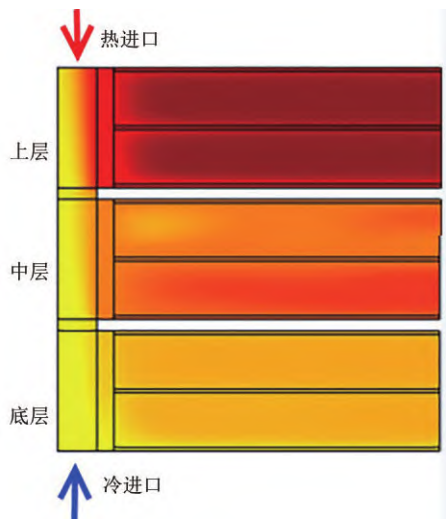


图 12 浸没式翅片管+梯级蓄热

Fig. 12 Submerged finned tube + cascade heat storage

综上所述,目前对于翅片和梯级蓄热的复合强化技术多采用数值模拟的研究方法。与无翅片相比,带有翅片的梯级蓄热系统具有更好的传热效果,系统蓄/放热时间明显缩短。在浸没式翅片管换热器中,多级蓄热材料在全蓄/放热模式下比单级蓄热材料更具优势。

2.4 翅片和多孔材料

随着近年来制造技术的发展,多孔材料凭借其相互连接的结构、高渗透性和高内表面积的优点在强化传热方面展现了巨大潜力。目前常用的多孔材料有泡沫铜、泡沫铝和新型的多孔陶瓷^[28]等。多孔材料的热导率比 PCM 大得多,可以通过嵌入的方式大大提高 PCM 的热导率。翅片和多孔材料的复合结构可以在增大换热面积的同时强化 PCM 的传热效果。

迟蓬涛等^[29]为了满足一些航空大功率元件的散热要求,提出采用翅片-泡沫铜复合结构作为导热增强介质的概念。通过瞬态和稳态方法对翅片厚度

分别为 0.5 mm、0.8 mm 和 1 mm 的翅片-泡沫铜/石蜡实验件进行了热特性测试。实验证明翅片能显著提高泡沫铜/石蜡的等效热导率和热响应速度。

Xie 等^[30]开发了一种 LHTES 装置,在石蜡(99% 的纯二十烷)中嵌入了孔隙率为 97.19% 的泡沫铜(图 13)。对铜翅片厚度分别为 0.5 mm、0.8 mm 和 1.0 mm 的样品进行了对比实验研究,测试样品在不同热通量下的传热性能。实验对比结果表明,使用翅片后样品内部最大温差峰值降低了 73.2%~90.3%。在相同翅片间距的情况下,最大温差随着热通量的增加和翅片厚度的减小而增大。带 1.0 mm 翅片的泡沫铜/石蜡复合材料的有效热导率为 11.4 W/(m²·K),是无翅片-泡沫铜/石蜡复合材料的 3.7 倍和纯石蜡的 42.2 倍。

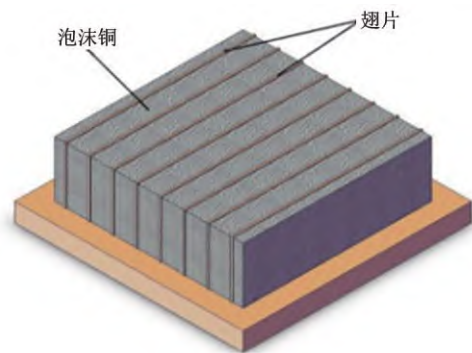


图 13 翅片+矩形泡沫铜

Fig. 13 Fin + rectangular foam copper

Zhang 等^[31]提出并应用了基于热管热交换器的翅片和泡沫铜的组合(图 14),对液体分数、烟传递率、固液界面的演变和温度等热性能进行探究。结果表明,与单独使用泡沫铜或单独使用翅片相比,该组合显示出更大的增强性能,并且当总体积分数固定时,使用特定的翅片体积比($\gamma_{fin}=0.5$)可以获得最佳增强效果。此外,进一步分析表明,增加总体积分数通过提高有效热导率来加速相变速率,但同时自然对流的影响逐渐减小。

Yang 等^[32]提出了管壳式蓄能装置翅片间隙内插入多孔金属泡沫强化传热的新技术(图 15),以完全蓄/放热完成时间、传热系数、温度响应和储能密度等为指标对装置的蓄/放热性能进行了对比分析。为了探究翅片和金属泡沫对改善相变的贡献,还对光滑管、翅片管和金属泡沫管进行了对比实验。结果表明:与光滑管相比,新型的基于金属泡

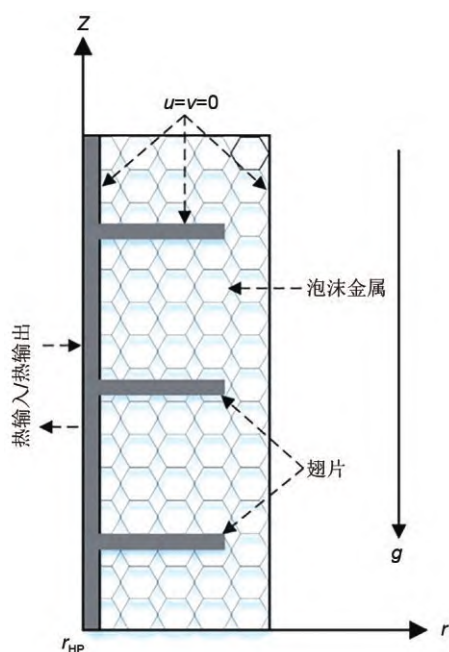


图 14 直翅+泡沫金属
Fig. 14 Straight fin + foam metal

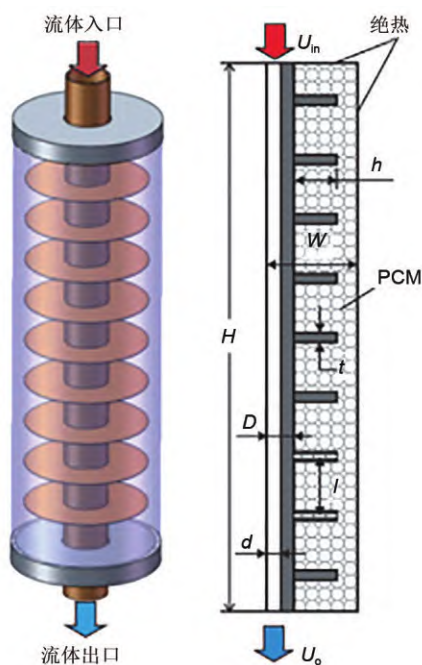
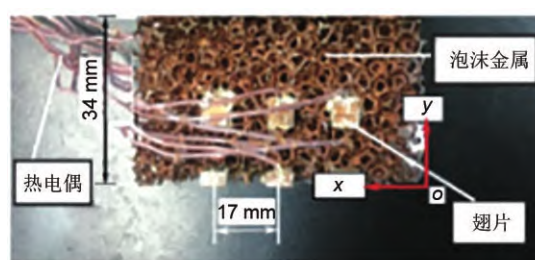


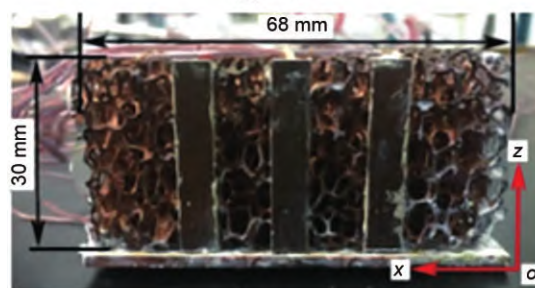
图 15 环形翅片+泡沫金属
Fig. 15 Ring fin + foam metal

沫翅片管结构, 完全熔化/凝固时间降低 85.83% 和 95.83%, 平均热通量增加 655.09% 和 1834.61%, 平均努塞尔数大幅增加 795.93% 和 4731.99%, 传热流体入口速度为 0.15 m/s。此外, 4 种装置的蓄/放热容量通过增加流量可以显著增强存储单元的蓄/放热性能。

田伟等^[33]对纯石蜡、添加金属泡沫及添加翅片-金属泡沫 3 种 PCM 系统进行了实验探究(图 16)。实验结果表明, 在 70 °C 的热源温度下, 金属泡沫的加入对完全熔化时间起重要的作用, 添加铜泡沫工况下完全熔化时间缩短为纯石蜡工况下的 56.53%; 添加翅片对完全熔化时间影响较小, 主要影响蓄热装置内部的温度均匀性。翅片-铜泡沫组的相界面以翅片为中心移动, 且整个蓄热装置内部受翅片影响, 在固相升温阶段和相变阶段结束初期温度升高速率均会有较明显的升高。



(a) 俯视图



(b) 主视图

图 16 矩形翅片+泡沫铜
Fig. 16 Rectangular fin + foam copper

综上所述, 与单独使用翅片或者单独使用多孔金属的强化传热相比, 翅片与多孔金属的复合传热强化技术对提高热导率、缩短熔化时间的改善作用更明显。通过合理的蓄热器结构设计并采用蓄热能力良好的 PCM, 蓄热系统的相变性能会有质的飞跃, 为相变蓄热材料的应用提供了持续优化的途径。但上述研究多针对材料的熔化过程, 对凝固过程的研究较少。另外, 多孔材料体积分数增加对热储存容量的影响也是需要考虑的问题, 如何确定最佳配比, 提高系统综合性能是未来重要的研究方向。

3 多孔材料式相变蓄热复合强化技术

利用多孔材料改善 PCM 相变换热性能是当前国内外学者广泛研究的一种方法。多孔材料浸渍技

术是提高传统 PCMs 在 LHTES 系统中热导率发展最快的方法。除了前文提及的多孔金属与翅片结合的复合传热强化技术外,多孔材料还可以与其他传热强化方式结合。

3.1 多孔材料和热管

近年来,将多孔材料和热管相结合用于强化相变蓄热的研究显著增多,这是因为热管作为核心传热元件具有高热通量和均温性的优点^[34],并且将多孔材料浸渍在 PCM 中可以在显著提升换热面积的同时提升热导率。

梁林等^[35-36]研究了平板微热管和泡沫铜相结合的蓄热装置的蓄/放热性能(图 17),探究不同 HTF 温度、体积流量、初始 PCM 状态和金属泡沫对蓄/放热功率和热效率的影响。结果表明,增加 HTF 和 PCM 的温差以及增大流量都可以提高蓄/放热功率。实验条件下,该装置的最大蓄/放热功率分别为 1.24 kW 和 1.43 kW。装置蓄/放热效率为 92% 和 94%,总效率为 87.4%。PCM 初始状态和金属泡沫孔隙率不影响稳态功率和最终 PCM 温度。但是,它们会影响达到稳定状态的时间。金属泡沫的孔密度对同时蓄/放热过程无显著影响。

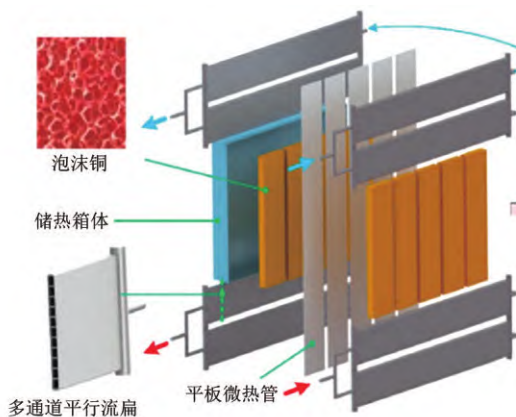


图 17 平板微热管+泡沫铜

Fig. 17 Flat micro heat pipe + foam copper

Nithyanandam 等^[37]对具有嵌入式热管的多孔金属增强型 LTES 系统进行瞬态模拟计算分析,以研究在蓄/放热过程中不同热管布置和多孔金属设计参数的系统热性能增强(图 18)。研究发现,由于浮力诱导对流的形成受到限制,蓄热过程中的传热强化随着多孔金属孔密度的增加而降低。在放热过程中,由于 PCM 和多孔金属泡沫之间的热交换作用有效面积较大,对于具有高孔密度的多孔金属

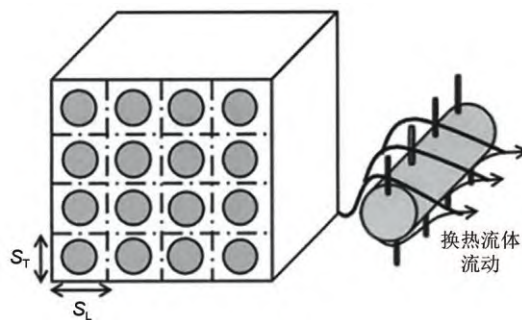


图 18 嵌入式热管+多孔金属

Fig. 18 Embedded heat pipe + foam metal

的 LTES 可以增强装置的传热速率。HTF 入口速度的增加会造成表面对流传热系数的增加,因此传热量也随之增加。然而,观察到蓄/放热效率随着 HTF 速度的增加而降低。

Ren 等^[38]探究了热管半径、多孔金属的孔隙率和孔径、纳米颗粒的体积分数对 PCM 存储单元熔化性能的影响。结果表明,对于系统的储能效率,存在一个最佳的多孔金属孔隙率和热管半径,多孔金属比纳米颗粒分散体更能够有效提高 PCM 传热能力,热管直径对熔化速率有重要影响。

多孔材料与热管的结合应用于相变蓄热是一种很有前途的传热方式。相对于蓄热过程,多孔材料对 PCM 放热的影响更显著。热管半径的增加会导致传热面积的增加,从而导致熔化加速,但过高的热管半径会限制热存储容量,在设计中应考虑热管半径的最佳值。如何确定最佳孔隙率和最优热管半径,需要大量实验研究去证实。

3.2 多孔材料和高热导率材料

纳米增强剂具有高导热、高频布朗运动、强吸附和团聚力强的特点,因此通常被用来提升相变材料的导热性能。常用的纳米材料有石墨烯纳米片、碳纳米纤维、碳纳米管、纳米二氧化钛、铜、铝纳米颗粒等。分散纳米材料传热强化在提高相变蓄热系统热性能方面具有指导意义。部分学者对纳米材料与多孔材料进行了复合强化传热实验研究,以期得到突破性的强化效果。

Hashem Zadeh 等^[39]研究了以癸酸为 PCM,以部分泡沫铜与 Cu/Go 纳米添加剂为增强剂,对相变蓄热的混合传热增强能力进行数值评估(图 19)。实验结果表明,部分泡沫铜与 Cu/Go 纳米添加剂的组合相变蓄热装置的蓄热功率可以提高到纯 PCM 蓄热功率的 4 倍。

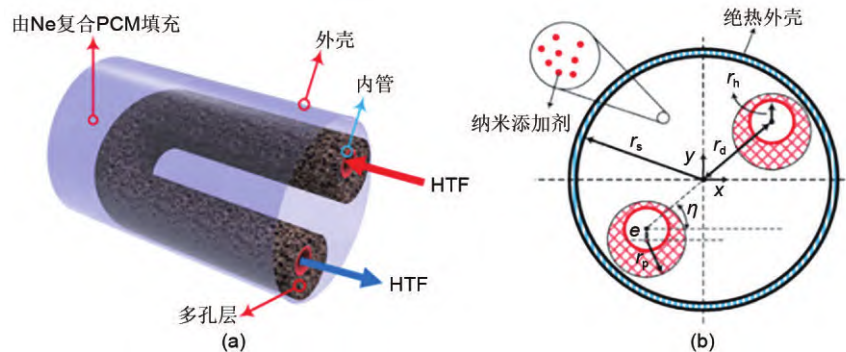


图 19 泡沫铜+纳米 Cu/Go
Fig. 19 Copper foam + nano Cu/Go

Mahdi 等^[40]研究了采用氧化铝纳米颗粒和泡沫铜复合强化技术的三管相变储能系统(图 20)。重点试验了纳米粒子浓度和泡沫孔隙率对相变前沿、温度分布和液体分数的影响。实验结果表明,在潜热储存系统中使用泡沫铜和纳米颗粒的分散,可以获得显著加速效果。随着多孔金属孔隙率的增加,由于泡沫韧带产生的高流动阻力,纳米粒子提高 PCM 相变率的潜力降低。此外,在多孔纳米增强 PCM 中,凝固速率高于单独的纳米增强 PCM 或单独的多孔 PCM。

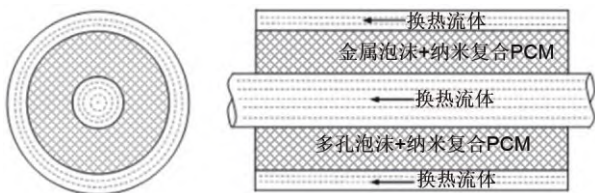


图 20 泡沫铜+纳米铝粒子
Fig. 20 Copper foam + nano-Aluminum particles

Senobar 等^[41]以 RT44HC 为 PCM, 实验对比了纯 PCM、PCM-纳米颗粒、PCM-多孔金属和 PCM-纳米颗粒-多孔金属 4 种材料的熔化和凝固特性(图 21)。熔化实验在恒温 and 恒定热通量热源两种情况下进行,凝固实验在恒温散热器下进行。结果表明:与纯 PCM 相比,PCM-纳米颗粒、PCM-多孔金属和 PCM-纳米颗粒-多孔金属复合材料在恒温热源熔化时传热速率分别提高了约 13%、17% 和 24%, 恒温热源凝固时节约时间约 24%、26% 和 65%。

Nedjem 等^[42]通过数值模拟的方法研究了金属泡沫和纳米添加剂两种增强传热方法在壳管热交换器中的潜力(图 22)。具体分析了流体工况和结构参数的影响,包括入口温度、金属泡沫材料、泡沫孔



图 21 泡沫铜+CuO 纳米颗粒
Fig. 21 Copper foam + CuO nanoparticles

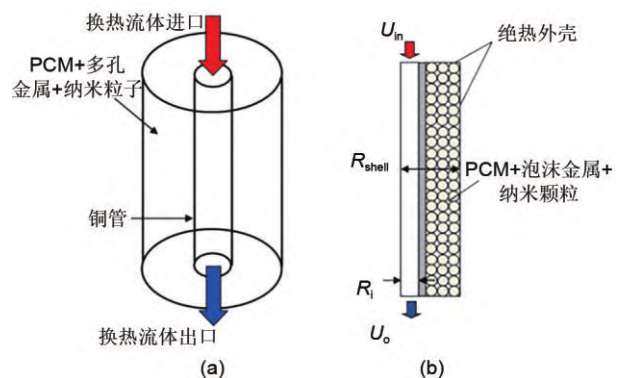


图 22 金属泡沫+纳米材料
Fig. 22 Metal foam + nanomaterials

隙率(0.95 和 0.98)、孔密度(10、40 和 70 PPI)和纳米颗粒体积分数(0、1% 和 3%)。结果表明,金属泡沫材料和纳米粒子浓度对相变材料的热性能有显著影响。金属泡沫和石墨烯纳米片分别将蓄热和放热时间减少了 96.11% 和 96.23%。此外,较低孔隙率的泡沫加快了蓄/放热过程,而孔密度没有明显影响。

部分文献提及,PCM 中添加纳米粒子会带来相变焓损失的现象,或存在纳米粒子团聚导致有效

纳米粒子含量降低。纳米粒子的获取或纳米微胶囊的制备成本比较高。如何找到有效的价格较低的纳米材料, 如何与多孔材料达到优化的耦合配比, 将复合材料量化生产投入到生活和工业应用, 是未来需要继续深入研究的课题。

3.3 多孔材料和梯级蓄热

将多孔材料浸渍在 PCM 中既可以提升 PCM 的热导率又可以增加换热面积。使用多个 PCM 形成级联或多级相变蓄热系统是保持传热过程均匀性和换热温差的有效方法, 将这两种传热强化技术结合既可以提升换热面积又可以保持换热均匀性^[43-44]。

郭绍振等^[45]提出了在 PCM 中填充金属泡沫和两级串联式梯级蓄热相结合的蓄热装置。通过改变串联 PCM 的热物性参数, 探究装置在不同工况下的蓄热特性。研究表明, 增大 PCM 的热扩散系数可以有效提升蓄热速率, 降低加热面温度, 但随着热扩散系数的增大, 加热面温度降低幅度减小。通过分析 Stefan 数, 得到了蓄热装置最佳的参数, 最后通过 Stefan 数为 2.88 时的实验工况验证了相关规律的正确性。

Hassani 等^[46]使用不同熔化温度的 3 层 PCM 代替单层 PCM 的效果, 同时与 Al-6061 多孔金属相结合以弥补低热导率的主要问题。研究表明: 与纯单层 PCM 相比, 纯 3 层 PCM 的熔化速度有所降低, 添加 Al-6061 多孔金属使 3 层 PCM 的熔化速率更加优越。

Mahdi 等^[47]将 5% 体积分数的纳米颗粒与平均孔隙率 0.95 的级联金属泡沫用于多个 PCM 段组成的管壳式储能系统的传热增强(图 23)。对比了多个 PCM、具有纳米颗粒的多个 PCM 和具有级联泡沫的多个 PCM 的不同排列对相变凝固时间演化的影响。结果表明: 将多个 PCM 与级联泡沫相结合模块显示出最佳的热响应率。与没有纳米颗粒或级联泡沫的单个 PCM 模块相比, 完全固化时间节省高达 94%, 具体取决于 PCM 的数量和级联泡沫段的数量。

Tian 等^[48]对 3 个等体积堆叠并串联放置在矩形管道中的 PCM(RT31、RT50、RT82)进行了数值分析(图 24)。提出了金属泡沫增强级联蓄热器(MF-CTES), 并对单级热能存储(STES)、级联热能存储(CTES)和 MF-CTES 的整体热性能进行了理论研究, 同时考虑了换热效率和焓效率。结果表明: 自然对流传热在 PCM 的每个阶段产生越来越大的涡

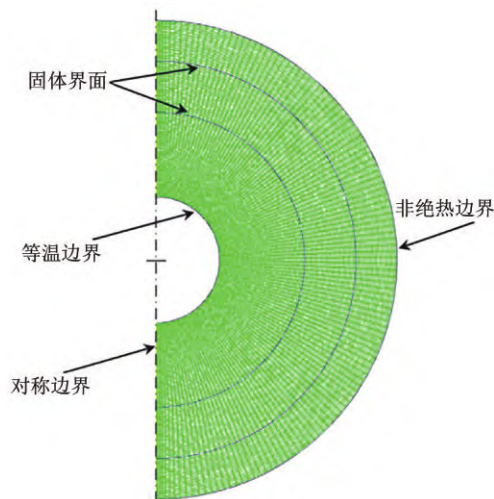


图 23 管壳式泡沫铜+梯级蓄热
Fig. 23 Shell-and-tube foam copper + cascade heat storage

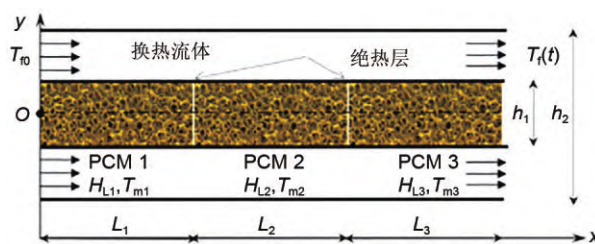


图 24 金属泡沫嵌入式梯级蓄热系统
Fig. 24 Metal foam embedded cascade thermal storage system

流, 但在金属泡沫增强的相变蓄热装置中其效果不太显著。具有 85% 孔隙率和 30 个孔/英寸的孔密度的装置确保了最高的等效焓传输率。与 STES 系统相比, CTES 系统的性能提高了 30%, 而带有金属泡沫的 MF-CTES 系统进一步提高了 200%~700%。

4 结论与展望

相变蓄热的传热强化可以通过增大换热面积、提升 PCM 传热系数和增加换热温差来实现, 单一的相变蓄热传热强化技术对于蓄热能力的提升有限, 至少结合两种强化技术的复合传热强化方法可以有效提高热导率, 加快蓄/放热速率。在翅片式换热器基础上拟(结)合热管、纳米材料、梯级蓄热和多孔金属技术, 在多孔金属基础上拟(结)合热管、纳米材料或者梯级蓄热, 均比单一的传热强化技术在蓄热、放热速率方面表现出优势。

当前研究表明, 通过热管结合翅片或泡沫铜是

比较理想的一种复合相变蓄热强化技术, 这种强化技术可以同时增强换热面积、PCM 热导率和传热均匀性, 使蓄热系统的综合传热性能得以全面提升。当前复合相变蓄热强化技术的研究参数主要集中于单一优化参数——相变完成时间、储能密度、结构尺寸参数的评价, 建议后期研究可以增加复合参数和无量纲参数的评价。另外, 目前对于同时使用热管和多个 PCM 的复合结构的研究较少。基于多个 PCM 的热管蓄热系统强化传热也是可以开拓的研究方向之一。

参考文献

- [1] 张仁元, 等. 相变材料与相变储能技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
ZHANG R Y, et al. Phase change materials and phase change heat storage technology[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] NAZIR H, BATTOOL M, BOLIVAR OSORIO F J, et al. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 129: 491-523.
- [3] LI Q, LI C, DU Z, et al. A review of performance investigation and enhancement of shell and tube thermal energy storage device containing molten salt based phase change materials for medium and high temperature applications[J]. Applied Energy, 2019, 255: doi:10.1016/j.apenergy.2019.113806.
- [4] MERLIN K, DELAUNAY D, SOTO J, et al. Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage systems: Comparative study of different solutions and thermal contact investigation between the exchanger and the PCM[J]. Applied Energy, 2016, 166: 107-116.
- [5] TAO Y B, HE Y L. A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 93: 245-259.
- [6] 金光, 肖安汝, 刘梦云. 相变储能强化传热技术的研究进展[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(6): 1107-1115.
JIN G, XIAO A R, LIU M Y. Research progress on heat transfer enhancement technology of phase change energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(6): 1107-1115.
- [7] 林文珠, 凌子夜, 方晓明, 等. 相变储热的传热强化技术研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(9): 5166-5179.
LIN W Z, LING Z Y, FANG X M, et al. Research progress on heat transfer of phase change material heat storage technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(9): 5166-5179.
- [8] MA Z J, LIN W Y, SOHEL M I. Nano-enhanced phase change materials for improved building performance[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 1256-1268.
- [9] IBRAHIM N I, AL-SULAIMAN F A, RAHMAN S, et al. Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 26-50.
- [10] 杨兆晟, 张群力, 张文婧, 等. 中温相变蓄热系统强化传热方法研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(10): 4389-4402.
YANG Z S, ZHANG Q L, ZHANG W J, et al. Research progress on heat transfer enhancement methods for medium temperature latent heat thermal energy storage systems[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(10): 4389-4402.
- [11] 张永学, 王梓熙, 鲁博辉, 等. 雪花型翅片提高相变储热单元储/放热性能[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 521-530.
ZHANG Y X, WANG Z X, LU B H, 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): 521-530.
- [12] 王君雷, 徐祥贵, 孙通, 等. 一种螺旋翅片式相变储热单元的储热优化模拟[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(2): 514-522.
WANG J L, XU X G, SUN T, et al. Simulation of heat storage process in spiral fin phase change heat storage unit[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(2): 514-522.
- [13] SHON J, KIM H, LEE K. Improved heat storage rate for an automobile coolant waste heat recovery system using phase-change material in a fin-tube heat exchanger[J]. Applied Energy, 2014, 113: 680-689.
- [14] 叶三宝, 刁彦华, 赵耀华. 新型平板热管相变蓄热器蓄放热性能分析[J]. 电力建设, 2014, 35(7): 136-140.
YE S B, DIAO Y H, ZHAO Y H. Heat storage-release property of phase-change thermal storage system with new flat heat pipe[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(7): 136-140.
- [15] 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: doi:10.1016/j.energy.2020.118166.
- [16] TIARI S, QIU S G, MAHDAVI M. Numerical study of finned heat pipe-assisted thermal energy storage system with high temperature phase change material[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 833-842.
- [17] TIARI S, QIU S G, MAHDAVI M. Discharging process of a finned heat pipe-assisted thermal energy storage system with high temperature phase change material[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 118: 426-437.
- [18] 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.
- [19] 肖玉麒, 甘曦梓, 曾轶, 等. 碳纳米管填料对相变储能式热沉性能的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(10): 1732-1738.
XIAO Y Q, GAN X Z, ZENG Y, et al. Effects of carbon nanotube fillers on performance of phase change energy storage-based heat sinks[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(10): 1732-1738.
- [20] UL HASNAIN F, IRFAN M, KHAN M M, et al. Melting performance

- enhancement of a phase change material using branched fins and nanoparticles for energy storage applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 38: doi:10.1016/j.est.2021.102513.
- [21] 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.
- [22] ELAREM R, ALQAHTANI T, MELLOULI S, et al. Numerical study of an Evacuated Tube Solar Collector incorporating a Nano-PCM as a latent heat storage system[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 24: doi: 10.1016/j.csite.2021.100859.
- [23] 王晨羽. 基于梯级相变的储能换热器的研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
- WANG C Y. Research on heat exchange device based on cascade phase change energy storage[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021.
- [24] SODHI G S, MUTHUKUMAR P. Compound charging and discharging enhancement in multi-PCM system using non-uniform fin distribution[J]. *Renewable Energy*, 2021, 171: 299-314.
- [25] XU H T, WANG N, ZHANG C Y, et al. Optimization on the melting performance of triplex-layer PCMs in a horizontal finned shell and tube thermal energy storage unit[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 176: doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115409.
- [26] SEFIDAN A M, SOJOUDI A, SAHA S C, et al. Multi-layer PCM solidification in a finned triplex tube considering natural convection[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 123: 901-916.
- [27] CHIU J N W, MARTIN V. Multistage latent heat cold thermal energy storage design analysis[J]. *Applied Energy*, 2013, 112: 1438-1445.
- [28] 姜峰. 陶瓷耦合中高温相变储热材料的制备、储热与强化传热研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- JIANG F. Study on preparation, heat storage and enhanced heat transfer of ceramic coupling medium-and high-temperature phase change materials[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [29] 迟蓬涛, 高红霞, 余建祖, 等. 翅片-泡沫铜复合结构的导热增强作用[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(4): 854-860.
- CHI P T, GAO H X, YU J Z, et al. Heat transfer enhancement of fin-copper foam composite structure[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(4): 854-860.
- [30] XIE Y Q, CHI P T, ZHOU Y, et al. Heat transfer enhancement for thermal energy storage using fin-copper foam within phase change materials[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2014, 12: 10729-10754.
- [31] ZHANG C W, FAN Y B, YU M, et al. Performance evaluation and analysis of a vertical heat pipe latent thermal energy storage system with fins-copper foam combination[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 165: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114541.
- [32] YANG X H, YU J B, XIAO T, et al. Design and operating evaluation of a finned shell-and-tube thermal energy storage unit filled with metal foam[J]. *Applied Energy*, 2020, 261: doi:10.1016/j.apenergy.2019.114385.
- [33] 田伟, 梁晓光, 赵硕, 等. 金属泡沫-翅片复合结构强化相变蓄热的实验研究[J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(11): 17-24.
- TIAN W, LIANG X G, DANG S, et al. Visualized experimental study on the phase change heat storage enhanced with metal foam[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(11): 17-24.
- [34] ALLEN M J, SHARIFI N, FAGHRI A, et al. Effect of inclination angle during melting and solidification of a phase change material using a combined heat pipe-metal foam or foil configuration[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 80: 767-780.
- [35] 梁林, 刁彦华, 康亚盟, 等. 平板微热管阵列-泡沫铜复合结构相变蓄热装置蓄放热特性[J]. *化工学报*, 2018, 69(S1): 34-42.
- LIANG L, DIAO Y H, KANG Y M, et al. Characteristic of latent heat thermal energy storage strengthened by flat micro heat pipe array-copper foam composite structure[J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(S1): 34-42.
- [36] LIANG L, DIAO Y H, ZHAO Y H, et al. Experimental and numerical investigations of latent thermal energy storage using combined flat micro-heat pipe array-metal foam configuration: Simultaneous charging and discharging[J]. *Renewable Energy*, 2021, 171: 416-430.
- [37] NITHYANANDAM K, PITCHUMANI R. Computational studies on metal foam and heat pipe enhanced latent thermal energy storage[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2014, 136: 051503.
- [38] REN Q L, MENG F L, GUO P H. 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.
- [39] HASHEM ZADEH S M, MEHRYAN S A M, GHALAMBAZ M, et al. Hybrid thermal performance enhancement of a circular latent heat storage system by utilizing partially filled copper foam and Cu/GO nano-additives[J]. *Energy*, 2020, 213: doi: 10.1016/j.energy.2020.118761.
- [40] 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.
- [41] SENOBAR H, ARAMESH M, SHABANI B. Nanoparticles and metal foams for heat transfer enhancement of phase change materials: A comparative experimental study[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 32: doi: 10.1016/j.est.2020.101911.
- [42] NEDJEM K, TEGGAR M, HADIBI T, et al. Hybrid thermal performance enhancement of shell and tube latent heat thermal energy storage using nano-additives and metal foam[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 44:doi: 10.1016/j.est.2021.103347
- [43] LAKSHMI NARASIMHAN N. Assessment of latent heat thermal storage systems operating with multiple phase change materials[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 23: 442-455.
- [44] ZHU F, ZHANG C, GONG X L. 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.
- [45] 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 S Z, XIAO G M, ZHANG N, 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.

[46] HASSANI S A M, DOMIRI G D. Melting effect in triplex-tube thermal energy storage system using multiple PCMs-porous metal foam combination[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 43: doi: 10.1016/j.est.2021.103154.

[47] MAHDI J M, MOHAMMED H I, HASHIM E T, et al. Solidification enhancement with multiple PCMs, cascaded metal foam and nanoparticles in the shell-and-tube energy storage system[J]. Applied Energy, 2020, 257: doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113993.

[48] TIAN Y, ZHAO C Y. Thermal and exergetic analysis of metal foam-enhanced cascaded thermal energy storage (MF-CTES)[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 58(1/2): 86-96.

广告索引

封一	比亚迪汽车工业有限公司	后插 4	深圳新宙邦科技股份有限公司
封二	亿纬锂能	后插 5	赣锋锂业股份有限公司
封三	国家电网公司电力科学研究院电池储能技术实验室	后插 6	中关村储能产业技术联盟
封四	中储国能(北京)技术有限公司	后插 7	深圳新威尔电子有限公司
后插 1	中科海钠科技有限责任公司	后插 8	天目湖先进储能技术研究院有限公司
后插 2	上海交通大学中英国际低碳学院	后插 9	北京卫蓝新能源科技有限公司
后插 3	湖南立方新能源科技有限责任公司	后插 10	公益广告