

相变储能散热器的储热/放热特性研究

段建国^{1,2}, 杨玲², 余心阳², 王亚雄^{1,2*}, 成建国², 刘洋³

(1. 内蒙古科技大学机械工程学院, 内蒙古包头 014010;

2. 内蒙古科技大学化学与化工学院, 内蒙古包头 014010;

3. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要:为开发更高效的热能储存散热设备,设计了一种新型模块化矩形腔体-内插 U 型管相变储能散热器,该相变储能散热器以石蜡为储能介质、泡沫铜为填充材料,通过在散热端设置风机实现结构优化,并针对该散热器的储热和释热过程,开展不同工质流量、装置入口空气流速和环境温度条件下的实验研究,结果表明在储能单元中泡沫铜显著增强石蜡导热性能,显著缩短储能时间,并有效提升储/放热速率;当装置入口空气流速为 6 m/s 时,其潜热释放时间约为 2 m/s 的 50%,当环境温度在 18℃ 时,其凝固时间较 25℃ 缩短了 32%。同时,散热间距的增加和空气入口温度的降低可以显著提高凝固过程的传热速率,缩短凝固时间。

关键词:石蜡-泡沫铜;储能散热器;储热/放热过程;相变储能;传热速率

中图分类号:TK02

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S2-0226-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S2.040

Study on heat storage/release characteristics of phase change energy storage radiator

DUAN Jian-guo^{1,2}, YANG Ling², YU Xin-yang², WANG Ya-xiong^{1,2*},
CHENG Jian-guo², LIU Yang³

(1. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology,

Baotou 014010, China; 3. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049, China)

Abstract:To develop more efficient thermal energy storage/release devices, a novel modular rectangular cavity phase change energy storage radiator with embedded U-shaped tubes is developed and designed, which employs paraffin as the energy storage medium and copper foam as the filling material. Structural optimization is achieved through installing a fan at the cooling end. Experimental studies are conducted on the heat storage and release processes of this radiator under different working fluid flow rates, inlet air velocities, and ambient temperature. Experimental results indicate that in the energy storage unit, copper foam enhances the thermal conductivity of paraffin significantly, reducing energy storage time effectively while improving both heat storage and release rates. The latent heat release time at an inlet air velocity of 6 m/s is approximately 50% of that at 2 m/s. The solidification time needed at 18℃ is 32% less than that at 25℃. Moreover, either increasing the heat release spacing or lowering the air inlet temperature can enhance heat transfer rate significantly during solidification process, shortening the solidification time.

Key words: paraffin-copper foam; energy storage radiator; heat storage/release process; phase change energy storage; heat transfer rate

随着世界能源结构的变化,储能技术备受关注并快速发展,而太阳能储存是解决能源需求和供应缺口的有效途径之一^[1-2]。相变蓄热系统以相变材料(PCM)显热或潜热的形式对太阳能的光和热进行存储和利用,其中,潜热储能在工作温度和储能密度方面均优于显热储能^[3]。有机相变材料的种类较多,可覆盖较宽的温度范围,具有优良的热物理特

性,因此在热能储存系统中展现出巨大的应用潜力,特别是在中低温相变储能领域的应用。但由于相变材料导热系数低、传热过程效率低,导致潜热储能的充放热性能较差^[4-5]。单一相变材料难以同时满足相变温度、潜热和导热性能的应用需求,为了克服这些挑战,热传递增强技术(如翅片^[6]、膨胀石墨^[7]、泡沫金属^[8-9]和金属粉末^[10]等高导热性材料的添

收稿日期:2025-02-26;修回日期:2025-07-20

基金项目:内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(2023QNJS050,2023QNJS060);校级创新创业项目(QM2025152)

作者简介:段建国(1989-),男,硕士,讲师,研究方向为相变材料及传热技术,951452224@qq.com;王亚雄(1964-),男,博士,教授,研究方向为相变储能与清洁能源应用,通讯联系人,yaxiongw@hotmail.com。

加)已经得到了广泛研究和优化。

高效相变装置的开发和设计对热能的有效储存和释放具有至关重要的作用,目前已经被国内外学者广泛关注和研究^[11-13]。相关相变储能散热器主要集中在对有壳管式、套管式、翅片式等强化相变行为进行研究,韩广顺等^[14]对比了内传热管和外传热管储热单元的换热特性,发现外传热管储热单元的换热特性明显优于内传热管式储热单元,熔化时间缩短 60.7%。Sparrow 等^[15]研究了 PCM 在翅片垂直管中的凝固实验,同时考虑了导热控制和自然对流控制的传热过程。实验发现当液体处于熔化温度时,热传导是主要传递方式,而当液体温度高于熔点时,自然对流是主要传递方式。Padmanabhan 等^[16]使用有限差分法研究了圆柱形环形空间中的相变过程,其中矩形、均匀间隔的轴向翅片附着在内壁保持等温的管道外表面上,翅片的增加有利于提升这种潜热储存系统的热性能。Marcel 等^[17]考虑了一种壳管式储热装置,壳体一侧为 PCM,内管作为储热系统,并对系统的瞬态行为进行了数值分析,研究了各种参数和散热片的存在对储热装置热性能的影响,发现在中等流量和工质入口温度的情况下,环形散热片可以取得更好的效果。

Velraj 等^[18]报道了带内部纵向翅片的圆柱形垂直管 PCM 储热系统,实验结果表明,带翅片系统的完全凝固时间约为无翅片系统的 $1/n$ (n 为翅片数量),但内部翅片存在固定难度的问题。Ismail 等^[19]研究了工质管浸入 PCM 较大管中的 PCM 的凝固过程受散热翅片的影响,结果表明翅片数量的增加使凝固速率降低了 14% 左右,而翅片厚度则无明显影响。Eftekhar 等^[20]研究了储热系统中石蜡的熔化过程,该系统由加热和冷却水平有翅管装置之间的垂直翅片组成。结果显示,在垂直翅片附近引起自然浮力流动,导致固体蜡快速熔化和沿冷却固体相表面的下沉气流。Choi 等^[21]使用三水合醋酸钠作为 PCM 的低温储热系统,分析了工质(水)的入口温度和流速对冷冻过程传热系数的影响,发现薄翅片对传热的影响可以忽略不计,而厚翅片管系统的传热系数约为无翅片管的 2 倍。Al-Abidi 等^[22]使用二维数值模型对 3 层翅片管换热器中 PCM 的熔化率进行了数值研究,分析了纯传导和自然对流两种传热方式。结果表明,翅片长度和数量对熔化率影响显著,而翅片厚度增加对熔化率影响较小。此外,翅片数量最多的 3 排翅片管换热器几何形状的总熔化时间与无翅片系统相比,减少了

34.7%。

本文开发了一种新型相变储能散热器,并对其散热端结构优化,使散热器具备结构简单、拆卸灵活的特点,可直接应用于太阳能/电-热转化储存领域,对比研究泡沫铜填充对储能散热器热特性的影响,通过对该低温相变储能散热器内相变材料温度的测试,分析了不同工质流量下储能散热器的储热性能,并研究了不同环境温度及风速对储能单元释热性能的影响,以期智能大容量低温相变储能散热器的开发设计提供实验依据。

1 实验装置及方法

1.1 实验材料

为了准确得到低温相变储热装置的强化传热特性,本文通过热电偶监测储能单元内不同位置相变材料的温度变化,可以得到相变材料在储热与散热过程中温度随时间的变化规律,系统研究不同运行工况对相变储能装置热性能的影响,以及相变材料在泡沫金属中的熔化与凝固机理。石蜡物性参数由差热扫描量热仪(DSC6000)测试,结果如表 1 所示。

表 1 石蜡与泡沫铜物性参数

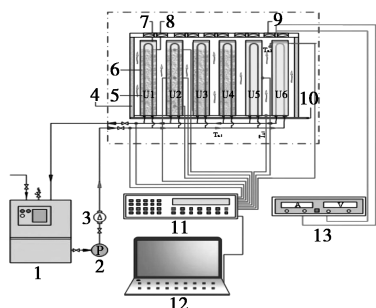
材料名称	$C_p / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$T_m / ^\circ\text{C}$	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\Delta H / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	Porosity / %
Paraffin	3.22	41.3~ 44.74	850	0.21	170.4	—
Copper foam	0.39	—	890	386.4	—	87.5

石蜡-泡沫铜相变复合材料矩形腔体式制备过程:称取等分量 5.5 kg 石蜡,于水浴锅中加热至完全熔化。然后,在泡沫铜(苏州佳士德泡沫金属有限公司)上开槽布置 U 型换热管,确保接触热阻够小,同时布置热电偶。最后,将带 U 型换热管的泡沫铜放在矩形储能单元的腔体中,采用液体沉浸法,将熔化的石蜡倒入腔体,直至完全浸没泡沫铜组件,并与上表面保留一定空间。待石蜡凝固后,便制备出了石蜡-泡沫铜的相变复合材料^[23]。其中,储能单元为铝片焊接矩形腔体(尺寸为 80 mm×160 mm×600 mm),储能相变材料为石蜡,强化传热介质为开孔泡沫铜,孔隙率 ε 为 87.5%,孔密度为 20 PPI,由 U 型换热管(接头为铜焊连接)组成。

1.2 实验系统与设计

图 1 所示的实验装置测试平台为相变储能装置

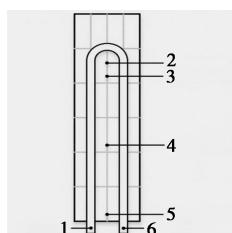
提供热源及恒定的流体入口温度,以研究其热性能。该平台主要由相变储能装置、恒温水浴、循环泵、管道系统、风机、测量设备等构成。本研究以相变储能单元为对象,在相变储能装置中分别填充了石蜡和石蜡-泡沫铜相变复合材料两种不同的相变材料进行分析对比。系统设计时,水作为传热流动介质,由恒温热水箱提供热源并输出恒定的水温,通过控制循环水泵的功率来调节水与储能单元内相变材料换热时间,并开始蓄热,数据采集系统负责监测相变储能装置内各监测点相变材料的温度分布及变化规律。



1—循环恒温水浴;2—循环泵;3—温度计;4—腔体式储能装置;
5—泡沫铜;6—PCM;7—储能单元;8—倒 U 型换热管;
9—风机;10—调节卷帘;11—数据采集器;12—笔记本;
13—直流电源

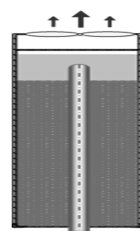
图 1 实验装置测试流程图

图 1 所示石蜡和泡沫铜/石蜡分别填充于编号 U5、U6 和 U1、U2、U3、U4 的储能腔体中,采用精度为 0.1℃ 的 TT-T-36 型热电偶监测温度;腔体内部 4 支热电偶分别插入距底部 20、220、420、460 mm 的泡沫铜孔中,同时在加热管进出口、空气通道进出口、水管进出水口及管壁中间位置布置热电偶。标记后热电偶通过安捷伦 34972A 数据采集器及笔记本电脑进行数据采集,每隔 10 s 记录一次数据,储能单元内热电偶位置分布和相变储能单元如图 2 所示。



1—进水口温度;2—460 mm 处测试点 T_{PC4} ;
3—420 mm 处测试点 T_{PC3} ;4—220 mm 处测试点 T_{PC2} ;
5—20 mm 处测试点 T_{PC1} ;6—出水口温度

(a) 热电偶分布图



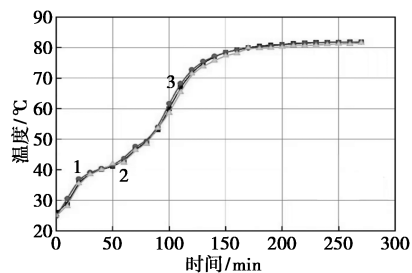
(b) 侧视图

图 2 相变储能单元示意图

本实验过程分为储热与散热 2 个阶段。在储热过程中,通过恒温水箱加热棒将传热流体(水)加热到指定温度(85℃)并趋于稳定后启动循环泵,高温传热流体经 U 形加热管循环输送至储能装置各单元进行热量交换,石蜡吸收热量开始熔化。换热流体温度设定在 85℃ ± 5℃,当 PCM 的温度与循环水的温度接近并且在 10 ~ 20 min 内温差稳定在 ± 0.5℃ 时,储能过程结束。随即关闭循环泵及恒温电加热水箱。散热过程中,先开启数据采集,打开储能装置上端保温顶盖和底部可调节插板,开启风机,依靠相邻储能单元之间的间隙,与由下到上的空气形成强制对流,此时风机改变风速进行对流散热,使外界的冷空气不断进入装置进行循环散热。当储热单元中的 PCM 完全固化,且温度在 15 min 内保持稳定,单元间的空气进出口温度差趋于 0℃ 时,则散热过程结束。实验分别在 1.0、2.0、4.0 L/s 的水流量下进行储热测试,在不同风速及 16、22、30℃ 环境温度下进行风机强制散热实验。

1.3 实验误差分析

基于本研究使用统一的实验装置,实验误差主要来自于探针热电偶、PCM 和泡沫铜的质量测量。其中,热电偶温度测量的不确定度为 ± 0.1℃,PCM 的质量测量误差为 ± 0.01 kg,泡沫铜的质量测量误差为 ± 0.01 kg。经计算,平均储热容量参数误差为 4.25%,平均蓄热率误差为 3.62%,平均散热率误差为 3.18%,对其中一组储热实验(换热流体温度为 85℃)的储热和散热过程分别重复 3 次,如图 3 所示,



1—第 1 次;2—第 2 次;3—第 3 次

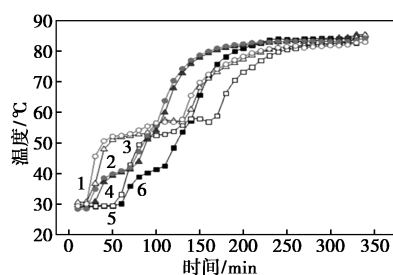
图 3 储能过程重复性实验

以减小实验误差。

2 结果与讨论

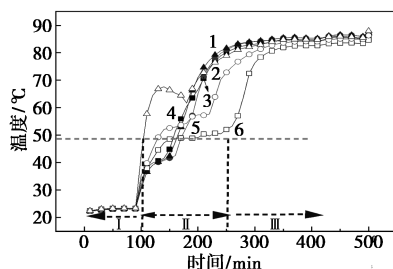
2.1 储热过程分析

图 4 为在恒定热源温度(85℃)下,泵输出不同流量热工质对储能装置储热速率的影响,对单元中两种 PCM 和复合 PCM 在监测点 T_{PC2} 上的温度分布进行分析和讨论。工质流量(Q)设定为 1.0、2.0、4.0 L/s 这 3 挡固定值,图 4(a)为装置 U1(复合 PCM)和 U6(PCM)单元中监测点 T_{PC2} 的储热过程的温度分布图。



1— $Q=4.0$ L/s 下 PCM; 2— 2.0 L/s 下 PCM;
3— 4.0 L/s 下复合 PCM; 4— 2.0 L/s 下复合 PCM;
5— 1.0 L/s 下 PCM; 6— 1.0 L/s 下复合 PCM

(a) 不同流量下的储热单元 T_{PC2} 温度分布图



1—复合 PCM 中 T_{PC3} ; 2—PCM 中 T_{PC3} ;
3—复合 PCM 中 T_{PC2} ; 4—复合 PCM 中 T_{PC1} ;
5—PCM 中 T_{PC2} ; 6—PCM 中 T_{PC1}

(b) 流量为 2.0 L/s 下储热单元沿轴向方向的储热分布图

图 4 不同流量对储能装置储热速率的影响

图 4(a)显示了泡沫铜复合相变材料与纯石蜡的相变温度变化趋势。在储热单元入口温度一致的情况下,通过改变工质流量导致的流速变化研究发现:当流量从 1.0 L/s 增加到 2.0 L/s 时,单位时间内储热单元的吸热量随流量增加而增大;当流量增至 4.0 L/s 后,吸热量增幅明显减弱,流量对储能影响不再明显。对于不同 PCM 填充的储热单元, 1.0 L/s 流速的温升速率比 2.0 L/s 的快,蓄热时间缩短 50% 以上;当流速由 2.0 L/s 增至 4.0 L/s,升温趋势基本相近,蓄热时间缩短幅度减小,流量对储热性能的影响减弱,而填充泡沫铜复合相变材料单

元的传热强化效果明显,说明在工质流速 < 2.0 L/s 的范围内,增加流量更有利于缩短储热时间。

由图 4(b)呈现了恒定 85°C 进口温度下储热单元轴向储热过程的温度-时间曲线,整体温升趋势呈现 3 阶段特征:(I) 固态显热储热阶段;(II) 固液共存潜热储热阶段;(III) 液态显热储热阶段。轴向方向上,泡沫铜复合相变材料单元温度曲线较为一致,比较均匀,受泡沫铜热传递作用相变材料升温速率较快,单元整体传热性能明显提升,(II)、(III) 阶段时间显著缩短。与纯石蜡单元相比,泡沫铜复合相变储热单元的整体储热时间减少约 34.6%。泡沫铜的应用极大地促进了热量传递的速度。在纯石蜡单元中的轴向方向上,顶部区域熔化速度明显快于底部区, T_{PC3} 较 T_{PC1} 相比温差达 10°C 以上, T_{PC3} 单元顶端温度曲线在 (I)、(II) 阶段斜率较大,升温速率快,并较快完成 (I)、(II) 阶段储热,但由于腔体内部温度不均匀,导致固体石蜡沉降,液体占比增加后,自然对流作用增强,出现 T_{PC3} 温度在 $120\sim 170^\circ\text{C}$ 区间下降现象,说明固-液共存其潜热吸收热量骤降,导致热量扩散速度减慢。对比两种不同材料单元,泡沫铜骨架通过提升传热驱动力显著增强单元有效热导率,这一结论也得到了文献 [23] 的论证。

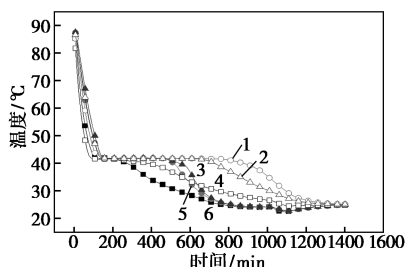
2.2 凝固过程分析

2.2.1 风速对凝固过程的影响

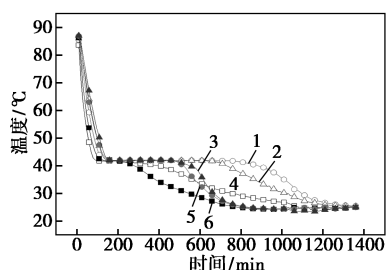
对实验装置的凝固过程优化设计,通过在单元上端设置风机强化对流换热,在环境温度恒定的条件下,通过改变风速大小,对其进行强制对流以强化其凝固过程。在储能初始温度 85°C 时,进行不同风速下的强制对流散热实验。凝固过程中,U 型加热管中不再有流体流动,依靠相邻储能单元之间的间距,在风机作用下,空气由下至上通过两侧壁面形成强制对流换热。

如图 5 和图 6 所示,为风速分别是 $2, 4, 6, 8$ m/s 的情况下不同轴向测温点的分布图。结果显示,两种材料在初始散热过程中,温度下降曲线近乎一样,且增加风速增加,初始曲线斜率增大,明显缩短了液态显热的释放时间。当风速从 2 m/s 增大到 6 m/s 时,液态显热的散热速率提高了 18%。在凝固过程到达潜热释放拐点后,相比石蜡单元,泡沫铜复合材料单元的潜热温度释放速度明显加快。在释放潜热阶段, 6 m/s 的风速下潜热释放速率约为 2 m/s 风速下的一半,这是由于泡沫铜的高导热性增强了以导热为主的热传递过程,强化了热量从石蜡向空气侧

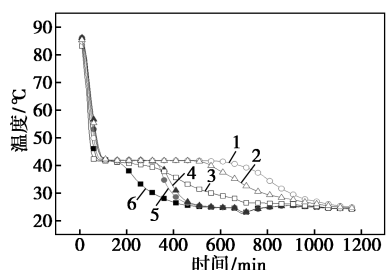
壁面的传递扩散。在凝固过程时,单元的散热速率明显加快。空气流速的增大强化了储能单元空气侧的传热驱动力,并显著提升了整个散热过程的传热



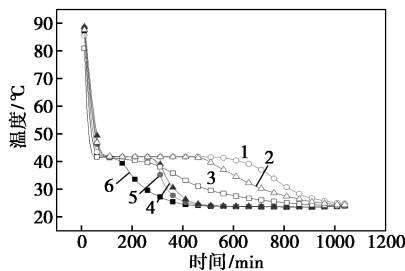
1—PCM 中 T_{PC2} ; 2—PCM 中 T_{PC3} ; 3—复合 PCM 中 T_{PC3} ;
4—PCM 中 T_{PC1} ; 5—复合 PCM 中 T_{PC2} ; 6—复合 PCM 中 T_{PC1}
(a) 风速为 2 m/s 下单元轴向方向的凝固过程温度分布



1—PCM 中 T_{PC2} ; 2—PCM 中 T_{PC3} ; 3—复合 PCM 中 T_{PC3} ;
4—PCM 中 T_{PC1} ; 5—复合 PCM 中 T_{PC2} ; 6—复合 PCM 中 T_{PC1}
(b) 风速为 4 m/s 下单元轴向方向的凝固过程

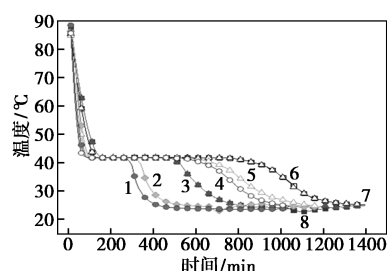


1—PCM 中 T_{PC2} ; 2—PCM 中 T_{PC3} ; 3—PCM 中 T_{PC1} ; 4—复合 PCM 中 T_{PC3} ; 5—复合 PCM 中 T_{PC2} ; 6—复合 PCM 中 T_{PC1}
(c) 风速为 6 m/s 下单元轴向方向的凝固过程



1—PCM 中 T_{PC2} ; 2—PCM 中 T_{PC3} ; 3—PCM 中 T_{PC1} ; 4—复合 PCM 中 T_{PC3} ; 5—复合 PCM 中 T_{PC2} ; 6—复合 PCM 中 T_{PC1}
(d) 风速为 8 m/s 下单元轴向方向的凝固过程

图 5 不同风速下单元轴向方向的凝固过程温度分布



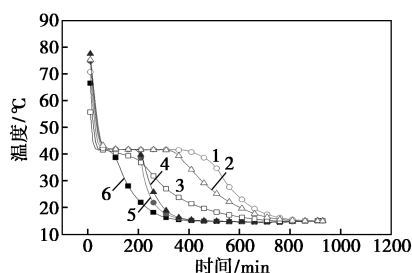
1—8 m/s 下复合 PCM; 2—6 m/s 下复合 PCM; 3—4 m/s 下复合 PCM; 4—8 m/s 下 PCM; 5—6 m/s 下 PCM; 6—4 m/s 下 PCM; 7—2 m/s 下 PCM; 8—2 m/s 下复合 PCM

图 6 不同风速下单元 T_{PC2} 测温点的总凝固过程温度分布

效率,有效缩短散热时间。泡沫铜与石蜡的复合作用对散热过程的传热增强效果显著。

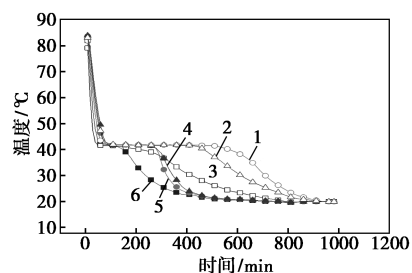
2.2.2 环境温度对凝固过程的影响

受实验室条件的限制,在储热初始温度为 85℃、6 m/s 风速强制对流换热条件下,对比研究 16、22℃ 和 30℃ 的环境温度对储能单元凝固过程的影响,不同环境温度下的散热温度分布如图 7 所示,其分别为环境温度 16、22℃ 和 30℃ 时不同相变材料的温度分布图。由图可以看出,初始散热阶段不同相变材料的温度下降速率几乎相同,液态显热释放时间均在 50 min 左右完成,表明环境温度的改变对相变材料液态显热的释放影响不明显。当测点温度下降至相变点后,泡沫铜复合材料单元温度下降速



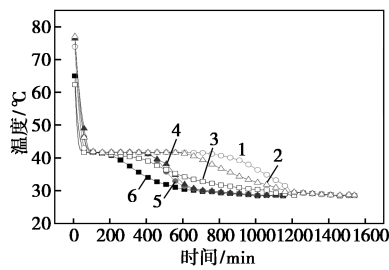
1—PCM 中 T_{PC2} ; 2—PCM 中 T_{PC3} ; 3—PCM 中 T_{PC1} ; 4—复合 PCM 中 T_{PC3} ; 5—复合 PCM 中 T_{PC2} ; 6—复合 PCM 中 T_{PC1}

(a) 环境温度为 16℃ 时不同相变材料的温度分布图

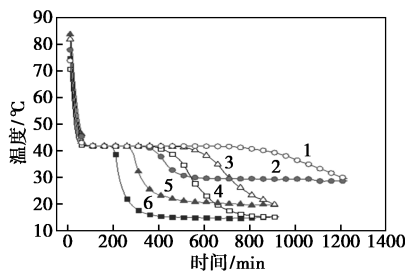


1—PCM 中 T_{PC2} ; 2—PCM 中 T_{PC3} ; 3—PCM 中 T_{PC1} ; 4—复合 PCM 中 T_{PC3} ; 5—复合 PCM 中 T_{PC2} ; 6—复合 PCM 中 T_{PC1}

(b) 环境温度为 22℃ 时不同相变材料的温度分布图



1—PCM 中 T_{PC2} ; 2—PCM 中 T_{PC3} ; 3—PCM 中 T_{PC1} ; 4—复合 PCM 中 T_{PC3} ; 5—复合 PCM 中 T_{PC2} ; 6—复合 PCM 中 T_{PC1}
(c) 环境温度为 30℃ 时不同相变材料的温度分布图



1—30℃ 时 PCM; 2—30℃ 时复合 PCM; 3—22℃ 时 PCM;
4—16℃ 时 PCM; 5—22℃ 复合 PCM; 6—16℃ 时复合 PCM
(d) 总温度分布图

图 7 不同环境温度的散热过程及总温度分布

率明显加快,并率先完成凝固过程,尤其在释放潜热阶段,其持续时间仅为填充石蜡单元的一半以下。说明在石蜡凝固后,高热导率泡沫铜的添加强化了导热为主的热传递过程,促进了热量从石蜡向空气侧壁面的传递。当室温从 30℃ 降至 22℃ 再到 16℃ 时,低温环境明显缩短单元的散热时间,主要原因为低温空气增强了储能单元空气侧的传热驱动力,有效促进热量的散失,缩短散热时间。

3 结论

本文提出了一种集热能储存与释放为一体的可调控相变储能散热器,该装置可实现太阳能/电能-热能的高效转化,合理解决能源供求不平衡这一难题,为后续开发智控大容量高效储能装备设计开发和实践应用奠定了理论基础。研究结果如下。

(1) 该储能散热器随着工质流速从 1.0 L/s 增加到 4.0 L/s 时,流量增加,泡沫铜/石蜡复合显著促进相变储能,相比流速在 1.0 L/s 的热流工质下,在 2.0 L/s 的流量工质的相变储能散热器储热时间约缩短超 50%,储热速率显著提升。

(2) 储能装置在环境温度为 16℃ 和对流风速 6.0 m/s 的条件下,相变储能单元的散热时间显著缩短,表现出良好的控温散热性能。

(3) 泡沫铜的添加能明显加快相变储热/放热过程,并显著缩短了储放热时间。

参考文献

- [1] Shen Y, Liu S, Mazhar A R, *et al.* A review of solar-driven short-term low temperature heat storage systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 141: 110824.
- [2] Jiang R, Qian G, Li Z, *et al.* Progress and challenges of latent thermal energy storage through external field-dependent heat transfer enhancement methods[J]. *Energy*, 2024, 304: 132101.
- [3] Jaisatia V A, Shastri S, Baljit S, *et al.* A systematic review of metal foam and heat pipe enhancement in Latent Heat Thermal Energy Storage system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 56: 105888.
- [4] 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: 113806.
- [5] Zhang C, Sun Q, Chen Y. Solidification behaviors and parametric optimization of finned shell-tube ice storage units[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 146: 118836.
- [6] Pu L, Zhang S, Xu 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.
- [7] Rakkappan S R, Sivan S, Ahmed S N, *et al.* Preparation, characterization and energy storage performance study on 1-Decanol-Expanded graphite composite PCM for air-conditioning cold storage system [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 123: 91-101.
- [8] Liu L, Su D, Tang Y, *et al.* Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62: 305-317.
- [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] Gu Z, Guo J, Cao J, *et al.* An advanced high-entropy fluorophosphate cathode for sodium-ion batteries with increased working voltage and energy density [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34: 2110108.
- [11] Khan Z, Tabeshf K. Parametric investigations to enhance thermal performance of paraffin through a novel geometrical configuration of shell and tube latent thermal storage system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 127: 355-365.
- [12] Seddegh S, Wang X, Joybari M M, *et al.* Investigation of the effect of geometric and operating parameters on thermal behavior of vertical shell-and-tube latent heat energy storage systems [J]. *Energy*, 2017, 137: 69-82.
- [13] Satbhai O, Roy S, Ghosh S. A numerical study to investigate the heat transfer and thermodynamic performance of a natural convection driven thermal energy storage system [J]. *Heat Transfer and Thermal Engineering*, 2017, 8: 3-9.

(下转第 237 页)

剂)、0.5%氢氧化钠+0.8%碳酸钠(防腐剂)、2%石膏粉(降滤失剂)、8%过硫酸钠(氧化剂)、2%三硝酸铜(过渡金属)、1.5%十二烷基磺酸钠(表面活性剂)。基于瓜尔胶为稠化剂的水基压裂液表观粘度为37.5 mPa·s;挑挂性能优异;彻底破胶时间为10 h;耐温性能好,60℃时表观粘度降至50 mPa·s以下;悬砂性能为6 mm/min;残渣含量为376 mg/L,均优于行业标准要求。

参考文献

- [1] Chen B, Xu J, Zhu L Z. Controllable chemical redox reactions to couple microbial degradation for organic contaminated sites remediation: A review[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, 139: 428-445.
- [2] Nie J, Wang Q M, Han L J, *et al.* Synergistic remediation strategies for soil contaminated with compound heavy metals and organic pollutants[J]. *J Environ Chem Eng*, 2024, 12(4): 113145.
- [3] Cheng M, Zeng G M, Huang D L, *et al.* Hydroxyl radicals based advanced oxidation processes (AOPs) for remediation of soils contaminated with organic compounds: A review[J]. *Chem Eng J*, 2016, 284: 582-598.
- [4] Shi F J, Feng S J. Oxidation effectiveness and kinetics of potassium permanganate on low-permeability phenanthrene-contaminated soil under fracturing conditions[J]. *Chem Eng J*, 2024, 496: 154373.
- [5] Yukselen-Aksoy Y, Reddy K R. Electrokinetic delivery and activation of persulfate for oxidation of PCBs in clayey soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(1): 175-184.
- [6] 沈曙华, 余锦涛, 孙天宇. 水力压裂增透多环芳烃低渗场原位修复技术研究进展[J]. *上海化工*, 2023, 48(5): 47-51.
- [7] 唐颖, 唐玄, 王广源, 等. 页岩气开发水力压裂技术综述[J]. *地质通报*, 2011, 30: 393-399.
- [8] Jaber T J, Saghir M Z. Three-dimensional study of permeability effect on convection in heterogeneous porous medium filled with a ternary hydrocarbon mixture[J]. *Journal of Porous Media*, 2011, 14(4): 305-315.
- [9] 余锦涛, 孙天宇, 戴毅. 水力压裂结合化学氧化法修复多环芳烃污染的低渗土壤[J]. *环境污染与防治*, 2024, 46(2): 174-180.
- [10] 何丹丹, 赖璐. 油气田废水配制水基压裂液技术研究进展[J]. *工业水处理*, 2024, 45(4): 1-17.
- [11] 周福, 赵健, 郭布民, 等. 中低温淡水基压裂液在海上油田的应用[J]. *广州化工*, 2024, 52(18): 164-166.
- [12] 罗梓轩, 袁斌, 张世阔, 等. 耐温水基聚合物压裂液制备及性能评价[J]. *当代化工*, 2024, 53(9): 2036-2039, 2044.
- [13] 丁瑜, 辜思曼, 何方舟, 等. 纳米材料在水基压裂液中的应用研究进展[J]. *石油化工*, 2022, 51(1): 100-106.
- [14] 何青, 姚昌宇, 袁胥, 等. 水基压裂液体系中交联剂的应用进展[J]. *油田化学*, 2017, 34(1): 184-190.
- [15] 李景娜, 张金生, 李丽华, 等. 水基压裂液有机硼交联剂的合成[J]. *精细石油化工*, 2013, 30(5): 33-36.
- [16] 林蔚然, 黄凤兴, 伊卓. 合成水基压裂液增稠剂的研究现状及展望[J]. *石油化工*, 2013, 42(4): 451-456.
- [17] 易辉永, 王世彬, 赵占江, 等. 耐盐、耐高温水基压裂液研制[J]. *应用化工*, 2020, 49(S2): 69-74.
- [18] 侯晓晖, 王煦, 王玉斌. 水基压裂液聚合物增稠剂的应用状况及展望[J]. *西南石油学院学报*, 2004, 26(5): 60-62, 89.
- [19] 苏清清, 王瑞芳. 水基压裂液增稠剂研究进展[J]. *化工设计通讯*, 2024, 50(7): 117-120.
- [20] 王满学, 何静, 韦海龙, 等. 可重复使用的水基压裂液的制备与性能评价[J]. *油田化学*, 2022, 39: 21-27.
- [21] 李昭滢, 杨旭, 杨杰, 等. 压裂液稠化剂两性聚丙烯酰胺的合成与性能评价[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(2): 109-115.
- [22] 王满学, 刘建伟, 何静, 等. 水基压裂液重复使用技术的现状及发展趋势[J]. *断块油气田*, 2018, 25(3): 394-397.
- [23] 王海荣, 张金生, 李丽华, 等. 水基压裂液性能影响因素的研究[J]. *现代化工*, 2014, 34(8): 95-97. ■
- [14] 韩广顺, 丁红胜, 黄云, 等. 套管式相变储热单元储热换热的研究[J]. *热能动力工程*, 2016, 31(2): 14-19.
- [15] Sparrow E M, Larson E D, Ramsey J W. Freezing on a finned tube for either conduction-controlled or natural-convection-controlled heat transfer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1981, 24: 273-284.
- [16] Padmanabhan P V, Krishna M M V. Outward phase change in a cylindrical annulus with axial fins on the inner tube[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1986, 29: 1855-1868.
- [17] Marcel L. Study of the heat transfer behavior of a latent heat thermal energy storage unit with a finned tube[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, 36: 2083-2092.
- [18] Velraj R, Seeniraj R V, Hafner B, *et al.* Experimental analysis and numerical modelling of inward solidification on a finned vertical tube for a latent heat storage unit[J]. *Solar Energy*, 1997, 60: 281-290.
- [19] Ismail K A R, Alves C L F, Modesto M S. Numerical and experimental study on the solidification of PCM around a vertical axially finned isothermal cylinder[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2001, 21: 53-77.
- [20] Eftekhari J, Haji-Sheikh A, Lou D Y S. Heat transfer enhancement in a paraffin wax thermal storage system[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1984, 106: 299-306.
- [21] Choi J C, Kim S D, Han G. Heat transfer characteristics in low-temperature latent heat storage systems using salt-hydrates at heat recovery stage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1996, 40: 71-87.
- [22] Al-Abidi A, Mat S, Sopian K, *et al.* Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 53: 147-156.
- [23] Liu Y, Duan J, He X, *et al.* Experimental investigation on the heat transfer enhancement in a novel latent heat thermal storage equipment[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 142: 361-370. ■

(上接第231页)