文章编号:1001-2060(2024)02-0117-09

变速运动相变胶囊强化传热实验研究

姜 珊,齐晓霓,屈晓航,李佳鹏

(山东理工大学 交通与车辆工程学院,山东 淄博 255000)

摘 要:为了研究变速运动对相变胶囊的强化传热效果,选用十六烷为相变材料,黄铜为壳制备圆柱形相变胶囊, 利用曲柄摇杆往复装置实现变速运动并搭建实验平台;实验设计相变胶囊在蓄、放热过程中温度的变化范围为 10~30℃,变速运动的方向为沿胶囊轴向或径向往复运动,振幅为6~12.5 mm,频率为1.55~3.78 Hz,通过测量 均匀分布在胶囊内部轴线上8个测点的温度数据分析变速运动的方向、振幅和频率对胶囊蓄、放热效果的影响。 实验结果表明:变速运动显著增强了相变胶囊的换热效果,在实验范围内,相比于静止状态,换热系数最大可增加 35.6%;胶囊沿径向运动比沿轴向运动强化换热效果更好,沿径向运动时换热时间最多可缩短26.7%;不同工况下 胶囊的放热时间均高于蓄热时间,增加振幅和频率可以有效提高蓄、放热效率且对蓄热过程的影响更加显著。

关键 词:储热;相变材料;胶囊;变速运动;强化传热

中图分类号:TK02 文献标识码:A DOI:10.16146/j. cnki. mdlgc. 2024. 02. 015

[引用本文格式]姜 珊,齐晓霓,屈晓航,等. 变速运动相变胶囊强化传热实验研究[J]. 热能动力工程,2024,39(2):117-125. JIANG Shan, QI Xiao-ni, QU Xiao-hang, et al. Experimental study on heat transfer enhancement of variable speed motion phase change capsules[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2024,39(2):127-125.

Experimental Study on Heat Transfer Enhancement of Variable Speed Motion Phase Change Capsules

JIANG Shan, QI Xiao-ni, QU Xiao-hang, LI Jia-peng

(School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, China, Post Code: 255000)

Abstract: In order to study the effect of variable speed motion on heat transfer enhancement of phase change capsules, the cylindrical phase change capsules were prepared by using hexadecane as phase change material and brass as shell. The crank rocker reciprocating device was used to realize the variable speed movement and build the experimental platform; phase change capsules were designed experimentally in the process of charging and discharging of the temperature range of $10 - 30 \,^{\circ}$, with the direction of variable speed movement along the capsule axial or radial reciprocating motion, amplitude of $6 - 12.5 \,^{\circ}$ mm, and frequency of $1.55 - 3.78 \,^{\circ}$ Hz. The influence of variable motion direction, amplitude and frequency on capsule charging and discharging effects was analyzed by measuring the temperature data uniformly distributed at eight measuring points on the inner axis of capsule. The experimental results show that the heat transfer of phase change capsules is significantly enhanced by variable speed motion. Compared with the static state, the heat transfer coefficient can be increased by up to 35.6% in the experimental range; the effect of enhanced heat transfer is better when the capsule moves along the radial direction than that along the axial direction, and the heat transfer time can be shortened by 26.7% at most; the discharging time of capsules under different working conditions is higher than the charging time. In-

基金项目:国家自然科学基金(52276157)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (52276157)

作者简介:姜 珊(1998-),女,山东理工大学硕士研究生.

收稿日期:2023-04-12; 修订日期:2023-05-13

通讯作者:屈晓航(1989 -),男,山东理工大学副教授.

creasing amplitude and frequency can effectively improve the efficiency of charging and discharging, and has a more significant impact on the charging process.

Key words: heat storage, phase change material, capsule, variable motion, enhancement of heat transfer

引 言

相变储热是利用相变材料发生相态变化时吸收 或释放大量潜热进行储热,相较于显热储热具有储 热密度高、储热容量大的优势。由于相变过程不发 生化学反应且能保持温度恒定,相较于热化学储热 更具备安全性和稳定性。相变储热技术常用于解决 热量在供求关系中的时间、空间不匹配问题,在太阳 能热利用^[1]、工业废热回收^[2]、电子设备温控^[3]、建 筑节能^[4]、纺织^[5]等领域具有重要作用。

热储能强化技术^[6-7]是解决相变储热导热率低 问题的重要技术。在相变材料中添加高导热介质或 成核剂^[8]、将膨胀石墨与相变材料有机结合^[9]、将 相变材料进行胶囊封装^[10]以及使用翅片^[11]等方法 是有效提高相变材料导热性和稳定性的单一传热强 化技术。组合传热强化技术是将使用翅片、热管、胶 囊封装、高导热纳米颗粒、泡沫金属等技术两种或多 种相结合,这种强化组合的方式可以通过充分发挥 各组件的优势,达到强化传热的效果^[12-13]。梯级传 热强化技术是将具有不同相变温度的相变材料按照 一定的顺序进行放置,换热流体流经相变材料时,两 者之间持续保持相对较大的换热温差,可以显著提 高相变材料的蓄、放热效率^[14-16]。

液态相变材料流动强化技术是通过调整相变储 能器的倾角或者对相变储能单元施加外作用场的方 式影响相变材料的流动状态,实现液态相变材料的 强化流动。Fan 等人^[17]在相变材料中添加磁性颗 粒并使之在旋转磁场的作用下进行圆周运动,使液 态相变材料发生强制对流进而增强传热速率。Qu 等人^[18]提出了通过对球形相变胶囊施加振荡运动 增强相界面的相对运动进而强化传热的新方法,研 究表明,增强振幅和频率均对蓄、放热过程有积极影 响。然而,针对圆柱形相变胶囊在运动状态下的换 热特性的研究少有文献阐述。

本文在圆柱形相变胶囊封装技术基础上增加外 作用场,对胶囊施加变速运动促进固 – 液相界面的 移动进而直接增强相变单元的对流换热,通过调节 相变胶囊变速运动的方向、振荡的频率和振幅分析 各因素对相变胶囊蓄、放热过程的影响,对相变胶囊 储热装置的研究提供参考。

1 实验系统及数据处理

1.1 相变胶囊的制备

圆柱形相变胶囊如图 1 所示。将双外丝螺纹黄 铜管与黄铜堵头 2 组合,沿圆柱的轴线方向使固定 有热电偶丝的亚克力方形管通过堵头 2 的中心孔, 固定方形管并使用铸工胶将堵头 2 侧密封。选用纯 度为 99% 的十六烷作为相变材料,从堵头 1 侧注入 胶囊内,填充率为 98%。安装堵头 1,使亚克力方形 管通过堵头 1 的中心孔并固定,使方形管上的 8 根 T 型热电偶丝均匀分布在相变胶囊内部,热电偶丝 编号从左到右为 1~8 顺序排列。最后使用铸工胶 将堵头 1 侧密封。相变胶囊内壁长度为 150 mm,内 径为 21 mm,壁厚为 3 mm。黄铜及十六烷的性质如 表 1 所示。



图1 相变胶囊示意图



表1 十六烷和黄铜的物理性质

Tab. 1 Physical properties of hexadeca
--

材料	熔点 <i>t</i> _m /℃	相变潜热 γ/kJ·kg ⁻¹	热导率 $\lambda/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	比定压热容 $c_p/\mathbf{J}\cdot\mathbf{kg}^{-1}\cdot\mathbf{K}^{-1}$	密度 p/ kg·m ⁻³
十六烷	18.2	235.6	0.131(s)	1 941(s)	773.5
	18.2	235.6	0.129(1)	2 037(1)	773.5
黄铜	-	-	109	377	8 440

1.2 实验装置

实验系统示意图如图2所示。



图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of experimental system

由图2可知,实验系统包括2个恒温水浴、固定 支架、固定夹、振荡机构、数据采集单元以及计算机。 恒温水浴1用于将相变胶囊加热或冷却到预定的温 度,恒温水浴2用于对预热或预冷的相变胶囊进行 放热和蓄热。振荡机构是电机驱动的曲柄摇杆往复 机械装置,可以在垂直方向模拟不同频率和振幅的 简谐变速运动,由固定在地面上的支架支撑。与振 荡机构相连的固定夹用于固定相变胶囊,使之进行 变速运动,振幅和频率均可调节。固定夹轴上有螺 纹可以旋转,便于调整胶囊的放置状态,固定夹将相 变胶囊水平固定时,运动方向为沿胶囊的径向运动; 固定夹将相变胶囊竖直固定时,运动方向为沿胶囊 的轴向运动,此时,堵头1侧在下,堵头2侧在上。 数据采集单元连接热电偶丝和计算机,将相变单元 中的温度数据记录在计算机中。

1.3 实验参数及步骤

十六烷的熔点为18.2 ℃,实验的温度范围为 10~30℃。实验中圆柱形相变胶囊沿重力方向做 简谐变速运动,简谐变速运动的振幅和频率由振荡 机构实现调节。图 3 为频率 f = 3.78 Hz 时不同振 幅下的以及振幅 s = 12.5 mm 时不同频率下运动速 度随时间的变化趋势。由图3可知,胶囊的速度受 简谐运动的振幅和频率的影响,在时间上呈现周期 性的变化趋势。在此基础上,在沿轴向和径向运动 的过程中,通过调节振幅和频率实现对蓄热和放热 时胶囊内部温度分布情况的预测,每种振幅(6,10 和 12 mm) 均与 5 种频率(1.55,2.3,3,3.4 和 3.78 Hz)一一对应。与静止时相变胶囊蓄、放热的温度 分布进行比较,每个运动条件下进行1次实验,共 64 次。实验时,先将相变胶囊放入恒温水浴1中进 行冷却或加热,直至其完全达到预定的温度,将相变 胶囊快速取出并固定在固定夹上,使之在恒温水浴 2 中运动,数据采集单元间隔2 s 采集1 次数据并记 录在计算机上。





1.4 数据处理

使用焓 - 孔隙率方法计算相变过程中的瞬间比

焓,根据相变单元中的平均温度确定液体体积分数β,β=0和β=1时分别代表固体和液体状态, 0<β<1代表糊状区域。为了确定糊状区域,在熔 点附近设置1个15.2~18.7℃的温度区间,即相变 材料的固相温度 t_s =15.2℃,液相温度 t_1 =18.7℃。 根据相变材料糊状区域的演变规律与实验实际情况 相结合,本研究选取该温度区间通过式(1)确定液 体分数:

$$\begin{cases}
\beta = 0, t \leq t_{s} \\
\beta = 1, t \geq t_{1} \\
\beta = \frac{t - t_{s}}{t_{1} - t_{s}}, t_{s} < t < t_{1}
\end{cases}$$
(1)

式中:t--胶囊内各测点的温度的平均值,℃。

某一时刻潜热 Δh 为:

$$\Delta h = \beta \gamma \tag{2}$$

相变材料在某一温度下的总焓值为:

$$h = h_{\rm c} + \Delta h = h_{\rm ref} + \int_{t_{\rm ref}}^{t} c_p \mathrm{d}t + \Delta h \tag{3}$$

胶囊内壁的表面积为:

$$S = 2\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 + 2\pi \left(\frac{d}{2}\right)l \tag{4}$$

胶囊内壁的平均传热系数 α 为:

$$\alpha = \frac{Q}{(t - t_{\text{hath}}) \times S} = \frac{|h_i - h_{i-1}| \times m}{\Delta \tau \times (t - t_{\text{hath}}) \times S}$$
(5)

式中: β —液体体积分数; Δh —瞬时潜热,kJ/kg;h— 总焓值,kJ/kg; h_e —相变材料的显热焓值,kJ/kg; t_{ref} —参考温度, \mathbb{C} ; h_{ref} —参考温度下的焓值,kJ/kg; S—胶囊内壁的表面积,m²;d—胶囊内径,m;l—胶囊 内壁长度,m; α —胶囊内壁的传热系数,W/(m²·K); Q—换热量,kJ; h_i , h_{i-1} —时间间隔为 $\Delta \tau$ 的不同时 刻的焓值,kJ/kg; $\Delta \tau$ —时间间隔,min;m—相变材料 的质量,kg; t_{bath} —恒温水浴 2 的温度, \mathbb{C} 。

1.5 实验误差分析

由于在实验过程中测量装置与仪器存在一定的 精度和误差,因此对温度的测量和平均传热系数的 计算进行了误差分析。经过校准得到实验使用 T 型热电偶的误差在 ±0.1 ℃,数据采集单元的误差 为 ±0.15 ℃,两个恒温槽中水浴温度的误差均为 ±0.1 ℃,根据平方根法^[19]得到相变材料瞬时温度 的误差为±0.28 ℃。本研究以沿胶囊径向运动、振 幅为6 mm、频率为1.55 Hz 时胶囊的蓄热情况为例 进行重复性的实验验证,多次实验胶囊内部各监测 点的温度最大差值均在误差范围内,说明计算得到 的相变材料的瞬时温度误差范围合理。实验开始前 测量相同时间内运动的周期数,计算得到其误差为 4.5%,振幅和胶囊尺寸的误差均为±0.2 mm。通 过整合实验过程中的各种误差计算得到胶囊内壁平 均传热系数的总误差为8.6%。

2 结果与讨论

2.1 平均传热系数与胶囊的蓄、放热过程

根据式(5)计算胶囊在沿轴向和径向变速运动 状态下,不同振幅和频率下的胶囊内壁的平均传热 系数,结果如图4所示。由图4可知,沿径向运动蓄 热过程和放热过程平均传热系数的范围分别是 41.4~58.2 W/($m^2 \cdot K$)和24.4~29.9 W/($m^2 \cdot K$); 沿轴向运动蓄热过程和放热过程的范围分别是 31.2~38.1 W/($m^2 \cdot K$)和25.0~27.4 W/($m^2 \cdot K$)。 运动状态下相变胶囊蓄热过程最大传热系数为 58.2 W/($m^2 \cdot K$),最小传热系数为31.2 W/($m^2 \cdot K$), 传热系数最大增加86.5%;运动状态下相变胶囊放 热过程最大传热系数为29.9 W/($m^2 \cdot K$),最小传热 系数为24.4 W/($m^2 \cdot K$),传热系数最大增加 22.5%。

图 5 为相变胶囊沿径向和轴向变速运动状态 下,振幅为 12.5 mm、频率为 3 Hz 时蓄、放热过程中 胶囊内部 8 个测点的温度分布情况。从图中可以看 出相变材料的蓄、放热过程可分为 3 个阶段:第 1 阶 段为显热储热,温度变化迅速,相态保持不变;第 2 阶段为相变储热,温度基本保持恒定,相变材料吸收 或者释放大量的热量,处于固 – 液共存态;第 3 阶段 为显热储热,相态完全改变。相变胶囊沿径向变速 运动时蓄热时间约为 17 min,放热时间约为 31.5 min,沿轴向变速运动时蓄热时间约为 28.7 min,放 热时间约为 32 min。沿径向变速运动时相变胶囊的 放热时间是蓄热时间的 1.85 倍,沿轴向变速运动时 放热时间是蓄热时间的 1.11 倍。相变胶囊放热主 要进行热传导,而蓄热主要依靠自然对流,所以放热 时间相对较长。







由图 5(a)可知,相变胶囊内部两端测点温度首 先达到相变温度,中心测点温度最后达到相变温度。 相变材料熔化过程中,两端测点位置首先结束相变 阶段,中心位置最后结束相变阶段,说明相变胶囊沿 径向变速运动时从两端向中心熔化。由图 5(b)可 知,相变胶囊内部从测点8到测点1温度依次达到 相变温度并结束相变阶段,说明沿轴向变速运动时 胶囊中相变材料从上至下熔化,由于受自然对流影 响严重,温度分层明显。由图5(c)和图5(d)可知, 胶囊沿径向做变速运动时,首先结束相变阶段进入 下一显热阶段的为测点 8 和测点 1,其次是测点 2. 最后结束相变阶段的是测点6,其余测点结束相变 阶段的顺序则并不显著:胶囊沿轴向做变速运动时, 首先结束相变阶段的为测点 8.其次是测点 2 和测 点1.最后结束相变阶段的为测点6和测点5.其余 测点结束相变阶段的时间大致相当。胶囊沿径向和 轴向做变速运动时,圆柱形胶囊的两端位置最先凝 固,靠近中心位置最后凝固,且凝固时间相差不大。 胶囊内部各测点蓄、放热时间的差异主要体现在固 - 液相变阶段, 而在显热阶段用时差距较小。

2.2 变速运动方向的影响

如图 4 所示, 蓄热过程中相变胶囊沿着径向变 速运动时的传热系数 41.4~58.2 W/(m²·K)明显 高于沿轴向变速运动时的 31.2~38.1 W/($m^2 \cdot K$). 而放热过程中,两种变速运动方向下传热系数相差 不大。如图5所示,当振幅为12.5 mm、频率为3 Hz 时,沿轴向变速运动时相变胶囊的蓄、放热时间分别 是沿径向的1.69和1.02倍。说明,沿径向运动比 沿轴向运动的传热系数更高、换热时间更短,且蓄热 过程更加显著。静止状态下胶囊沿径向放置的蓄、 放热时间分别为 20.7 和 37.2 min,沿轴向放置的 蓄、放热时间分别为 30.5 和 36.6 min;运动状态下, 沿径向运动的相变胶囊的蓄、放热时间最短为15.2 和 29.3 min,相比静止状态下分别提高了 26.6% 和 21.2%,沿轴向运动的相变胶囊的蓄、放热时间最短 为24.4和31.7min,相比静止状态下分别提高了 20%和13.4%。根据1.4节中选取的糊状区的温 度范围计算相变材料的相变时间。

图 6 为振幅 12.5 mm、频率 3 Hz 时蓄、放热过 程中相变胶囊沿径向、轴向变速运动以及静止状态 下,其内部测点 4 和测点 6 的温度分布情况。由图 6(a)和图 6(b)可知,蓄热过程中沿径向变速运动 时测点 4 的相变时间约为 8.3 min,沿轴向变速运动 时间约为 17.6 min,沿轴向是径向的 2.12 倍,测点 6 的情况也相似。两种状态下胶囊的显热蓄热阶段 温度变化趋势相当,说明不论是在静止状态还是在 变速运动状态下,相变时间缩短,沿径向比沿轴向的 蓄热效率更高。由图 6(c)和图 6(d)可知,沿径向 变速运动时的相变时间比沿轴向变速运动用时略 长,但是两种状态下的放热时间相差并不显著,说明 运动方向的改变对相变胶囊的放热过程影响较小。



图 6 蓄、放热过程中变速运动方向对温度变化的影响 Fig. 6 Influences of variable speed motion direction on temperature variation during charging and discharging

2.3 振幅的影响

如图4所示,在相同变速运动方向和频率下,增 大振幅可以明显提高相变胶囊的传热系数。图7为 蓄、放热状态下振幅不同时胶囊内部测点4和测点 6的温度分布。





由图 7(a) 和图 7(b) 可以看出, 前10 min各状 态下的温度曲线几乎完全重合,直至相变结束曲线 才显示出明显的差异,在后半段的显热蓄热阶段温 度曲线的上升趋势相同,证明振幅的增加主要影响 相变阶段。相对于静止状态,振幅为12.5 mm 时测 点 4 的 蓄热时间从 21.4 min 缩短至 15.6 min, 缩短 了 27.1%:测点 6 的蓄热时间从 19.9 min 缩短至 15.0 min, 缩短了 24.6%。由图 7(c) 和图 7(d) 可以 看出,相对于静止状态,振幅为12.5 mm 时测点4 的放热时间从 38.4 min 缩短至 30.3 min, 缩短了 21.1%: 测点 6 的放热时间从 36.8 min 缩短至 31.4 min, 缩短了 14.7%。根据胶囊内部各测点的 平均温度计算胶囊整体的蓄、放热时间,蓄热时间最 长为 20.0 min, 最短为 16.9 min, 缩短了 15.6%; 放 热时间最长为 32.0 min, 最短为 29.4 min, 缩短了 8.2%。相对于放热过程,振幅的变化对蓄热过程的 相变阶段影响更大。

2.4 频率的影响

如图 4 所示,随着变速运动频率的提高,换热系 数具有显著的上升趋势。图 8 为胶囊水平放置、振 幅为 12.5 mm 时蓄、放热过程中测点 4 和测点 6 在 不同频率下的温度分布情况。由 8(a)和图 8(b)可 以看出,前 10 min 以内温度曲线几乎重合,随着频 率的提高,相变结束时间显著缩短,后半段的显热阶 段呈现相同的上升趋势,说明频率的提升可以有效 地提高蓄热速率,且主要影响相变阶段。相对于静 止状态,频率为 3.78 Hz 时测点 4 的蓄热时间从 20.5 min 缩短至 15.2 min,缩短了 25.8%;测点 6 的蓄热时间从 19.6 min 缩短至 15.1 min,缩短了 22.9%。频率从 1.55 Hz 增加到 3.78 Hz 时,相变 胶囊整体蓄热时间最长为 19.4 min,最短为 15.2 min,缩短了 21.6%。

由图 8(c)和图 8(d)可以看出,相对于静止状态,频率为 3.78 Hz 时测点 4 的放热时间从 38.8 min 缩短至 30 min,缩短了 22.7%;测点 6 的放热时间从 36.4 min 缩短至 32 min,缩短了 12.1%。频率 从 1.55 Hz 增加到 3.78 Hz 时,相变胶囊整体放热时间最长为 34.1 min,最短为 29.3 min,缩短了 14.1%。频率越高,达到相变阶段越早,但是相变后

的显热阶段趋势变平缓,说明频率的变化对显热阶段也会造成积极或者消极的影响。







3 结 论

以十六烷为相变材料,黄铜为壳制备圆柱形相

变胶囊,建立了变速运动对相变胶囊蓄、放热影响的 实验装置,主要研究运动方向、振幅和频率对蓄、放 热速率的影响,得到结论如下:

(1)变速运动对圆柱形储热胶囊蓄、放热过程的传热有显著强化作用,实验范围内,蓄热过程传热系数最大增加86.5%,放热过程传热系数最大增加22.5%。

(2)相比静止,径向运动时蓄热时间最多可缩 短26.6%,放热时间最多可缩短21.2%,轴向运动 时蓄热时间最多可缩短20%,放热时间最多可缩短 13.4%;径向运动时蓄、放热速率更高;运动方向对 蓄热过程的影响要大于放热过程。

(3) 振幅从 6 mm 增加到 12.5 mm 时,蓄热时 间最多缩短 15.6%,放热时间最多缩短 8.2%;频率 从 1.55 Hz 增加到 3.78 Hz 时,蓄热时间最多缩短 21.6%,放热时间最多缩短 14.1%;振幅和频率的 增加均会缩短相变材料的蓄、放热时间,同时对蓄热 过程的影响更加明显。

参考文献:

- CHEN W, CHEN W. Analysis of heat transfer and flow in the solar chimney with the sieve-plate thermal storage beds packed with phase change capsules [J]. Renewable Energy, 2020, 157: 491-501.
- [2] LI D C, WANG J H, DING Y L, et al. Dynamic thermal management for industrial waste heat recovery based on phase change material thermal storage [J]. Applied Energy, 2019, 236: 1168-1182.
- [3] 尹辉斌,高学农,张正国.相变温控应用于电子设备的抗热冲击性能研究[J].高校化学工程学报,2017,31(3):554-560.
 YIN Hui-bin, GAO Xue-nong, ZHANG Zheng-guo. Application of phase-change thermal control in heat shock resistance of electronic devices [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2017, 31(3):554-560.
- [4] DA CUNHA S R L, DE AGUIAR J L B. Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27:101083.
- [5] 郭制安,隋智慧,李亚萍,等.相变双向调温纺织材料制备技术 研究进展[J].化工进展,2022,41(7):3648-3659.

GUO Zhi-an, SUI Zhi-hui, LI Ya-ping, et al. Research progress on preparation technology of phase-change bidirectional temperatureregulating textile materials [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(7):3648 – 3659. [6] 张春伟,陈 静,王成刚,等.相变储能技术的传热强化方法综述[J].制冷学报,2023,44(1):1-13.

ZHANG Chun-wei, CHEN Jing, WANG Cheng-gang, et al. Review on heat transfer enhancement methods of latent heat storage technology [J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(1):1-13.

[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 Wen-zhu,LING Zi-ye, FANG Xiao-ming, et al. Research progress on heat transfer of phase change material heat storage tech-

nology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(9):5166 - 5179.

- [8] HAN L,ZHANG X, JI J, et al. Research progress on the influence of nano-additives on phase change materials [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55:105807.
- [9] 陆 威,吴永卫. 纳米铝粉/石蜡/膨胀石墨复合相变材料的制备及性能研究[J]. 热能动力工程,2017,32(2):101-105.
 LU Wei, WU Yong- wei. Preparation and study on the performance of the nano-aluminum/paraffin/expanded graphite phase change composites [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2017,32(2):101-105.
- [10] LI M J, JIN B, MA Z, et al. Experimental and numerical study on the performance of a new high-temperature packed-bed thermal energy storage system with macroencapsulation of molten salt phase change material [J]. Applied Energy, 2018, 221:1-15.
- [11] 王倩蓉,李正贵,卢昌燊,等. 翅片式相变储能器内赤藻糖醇 蓄热性能研究[J]. 热能动力工程,2021,36(2):49-56.
 WANG Qian-rong, LI Zheng-gui, LU Chang-shen, et al. Study on the thermal storage performance of erythritol in a fin type phase change energy storage device [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2021,36(2):49-56.

[12] SAZVAR B, MOQTADERI H. A numerical study on the capacity

improvement of cylindrical battery cooling systems using nano-enhanced phase change material and axisymmetric stepped fins [J]. Journal of Energy Storage,2023,62:106833.

- [13] LI W Q, LI Y X, YANG T H, et al. Experimental investigation on passive cooling, thermal storage and thermoelectric harvest with heat pipe-assisted PCM-embedded metal foam [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 201:123651.
- [14] ZHANG Z, LIANG M, CI Z. Thermal performance analysis of latent heat thermal energy storage with cascaded phase change materials capsules under varying inlet temperature [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 62:106893.
- [15] PANCHAL J M, MODI K V, PATEL V J. Development in multiple-phase change materials cascaded low-grade thermal energy storage applications: A review [J]. Cleaner Engineering and Technology, 2022, 8:100465.
- [16] YUAN F, LI M J, MA Z, et al. Experimental study on thermal performance of high-temperature molten salt cascaded latent heat thermal energy storage system [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 118:997 – 1011.
- [17] FAN Y, YU M, ZHANG C, et al. Melting performance enhancement of phase change material with magnetic particles under rotating magnetic field [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 38:102540.
- [18] QU X, JIANG S, QI X. Experimental investigation on performance improvement of latent heat storage capsule by oscillating movement [J]. Applied Energy, 2022, 316;119130.
- [19] VENKITARAJ K P, SURESH S, PRAVEEN B, et al. Experimental heat transfer analysis of macro packed neopentylglycol with CuO nano additives for building cooling applications [J]. Journal of Energy Storage, 2018, 17:1 – 10.

(刘 颖 编辑)