文章编号: 1001-4543(2024)01-0001-08

# 套管式太阳能相变蓄热器强化传热数值模拟

李俊毅a, 王继芬a,b, 谢华清b

(上海第二工业大学 a. 资源与环境工程学院; b. 上海先进热功能材料工程技术研究中心, 上海 201209)

**摘** 要:因太阳能相变蓄热技术节约资源、保护环境,符合我国目前的能源发展要求,而受到研究人员的关注。而太阳能具有间歇性、不稳定等特点增加了其利用的难度。通过有限元数值分析方法对套管式相变蓄热器进行模拟,探究相变材料 (phase change materials, PCM) 在太阳能相变蓄热器中的作用。结果表明,添加膨胀石墨可大幅度提升太阳能蓄热器的蓄放热效率。相比于传统石蜡蓄热,在入口速度、环境温度等初始条件相同时,添加质量分数为 20%的膨胀石墨的石蜡蓄热时长缩短了 91.11%,起到强化传热的效果。该研究为研制太阳能热水器、高效换热器及建筑节能和其他领域的热能储存等提供重要参考。

关键词:相变蓄热;有限元数值分析;膨胀石墨;强化传热中图分类号:TK02文献标志码: A

## Numerical Simulation of Enhanced Heat Transfer in Cased Solar Phase Change Accumulators

LI Junyi<sup>a</sup>, WANG Jifen<sup>a,b</sup>, XIE Huaqing<sup>b</sup>

(a. School of Resources and Environmental Engineering; b. Shanghai Engineering Research Center of Advanced Thermal Functional Materials, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

**Abstract:** The solar phase change heat storage technology is concerned because it can save resources and protect environment, and meet the requirement of energy development in our country. Its intermittent and unstable characteristics increase the difficulty of its utilization. The role of phase change materials (PCM) in solar phase change heat storage is explored by simulating the cased phase change heat storage through finite element numerical analysis method. The results show that the addition of expanded graphite can substantially improve the heat storage and discharge efficiency of solar thermal accumulators. Compared with the conventional paraffin heat storage, the heat storage time of paraffin with 20% mass fraction of expanded graphite is shortened by 91.11% under the same initial conditions of inlet velocity and ambient temperature, which has the effect of enhancing heat transfer. This study provides an important reference for the development of solar water heaters, high-efficiency heat exchangers and thermal energy storage in buildings and other fields.

Keywords: phase change heat storage; finite element numerical analysis; expanded graphite; enhanced heat transfer

0 引言

#### 随着国民经济的飞速发展,我国的发展步入了

新时期,城市化进程和大国梦的实现依托于大量煤、 石油、天然气等不可再生资源。随着"碳达峰、碳中 和"政策的提出,全国各个地区都开始注重可持续

收稿日期: 2023-04-17

通信作者:王继芬(1975-),女,吉林延边人,教授,博士,主要研究方向为能源材料、多尺度传热及固废资源化。

E-mail: wangjifen@sspu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目 (51776116, 52176081),上海科技基金 (22010500600) 资助

发展,加强节能减排的措施,降低了对煤、石油等化石燃料的使用需求<sup>[1-2]</sup>。

太阳能作为可再生能源,其分布范围非常广阔, 而且是无污染的高洁净能量,可利用光电、光热以 及各种转化的技术被广泛使用。套管式太阳能相变 蓄热器是一种利用相变材料 (phase change materials, PCM) 蓄热的太阳能利用设备,其基本原理是利用 PCM 在相变时吸收或释放大量的热量,实现热能 的储存和利用<sup>[3]</sup>。在套管式太阳能相变蓄热器中, PCM 被置于内外两层管之间,热量通过外层管壁 传入 PCM 中,使其发生相变并吸收热量,当需要利 用储存的热能时,热量通过内层管壁传出。目前相 变储能强化传热可以从 3 个方面入手 (见图 1),分 别为增大导热系数、增大传热面积和提升温差均匀 性<sup>[4]</sup>。



图 1 相变传热方法分类

Fig. 1 Classification of phase change heat transfer methods

为了增大导热系数提高 PCM 的热导率,前人 展开了大量的研究。添加多孔泡沫金属可提高蓄 热器的蓄热效率,且不同的填充比例和多孔金属 泡沫孔隙率对蓄热效率的提升有所不同[5-6]。在 PCM 中加入纳米颗粒来提高蓄热效率。通过改变 纳米颗粒浓度和种类等最终得出结果,当纳米颗 粒的体积分数为0.5%、管道长度为40cm、流量为 0.025 kg/s 和入口温度为 80 ℃时, 纳米增强相变材 料 (nano-enhanced phase change material, NePCM) 的 熔化时间最短, 蓄热性能最好 [7]。通过实验观察纳 米金属复合材料的温度下降速率、蓄放热时间和传 热机理,研究人员发现将纳米铁添加到石蜡中可以 有效解决石蜡导热系数低下和传热性能差的问题。 当纳米铁的质量分数为0.2%时,复合样品的固态导 热系数是纯石蜡的 2.9 倍<sup>[8]</sup>。随着纳米铁添加量的 增加,复合材料的热性能进一步提高。然而,需要注 意的是,纳米铁的添加量不应超过0.51%。过多的添

加量可能会对 PCM 基体的特性产生负面影响,不利 于传热强化。采用膨胀珍珠岩多孔网络吸附石蜡的 方法,制备了形态稳定的月桂酸/膨胀珍珠岩 (lauric acid/expanded perlite, LA/EP) 复合材料, 发现该复合 材料具有合适的相变温度、良好的热稳定性和潜热, 具有广泛应用的潜力 [9]。泡沫陶瓷/熔盐复合相变材 料 (ceramic foam/molten salt composite phase change material, CPCM) 是一种良好的高温蓄热储能材料, 通过对其熔融相变传热模拟发现,陶瓷骨架显著增 强了熔盐中的传热,降低了复合材料的温差,并将 CPCM 的熔化率提高了 41.3%<sup>[10]</sup>。前期研究结果表 明,石墨类具有较好的导热性能,其高导热系数是由 于其特殊的二维晶格结构和强化的键合方式,添加 膨胀石墨可提高 PCM 的蓄热效率<sup>[11]</sup>。添加石墨类 材料预期提高 PCM 的热传导性和热储存性, 为中温 热能存储技术的发展和应用提供了有力的支持。

本文借助 Fluent 软件, 采用有限元数值分析方 法, 探究在入口速度、环境温度等初始条件相同的 情况下, 填充纯石蜡和添加 5%、10%、15%、20% 膨 胀石墨的膨胀石墨/石蜡复合 PCM 对套管式太阳能 蓄热器蓄热性能的影响。通过研究不同相变储热材 料的性能, 希望为 PCM 种类对蓄热时间和蓄热效率 的影响提供理论依据, 并为后续实验研究提供实际 应用的可能性。本文探究膨胀石墨/石蜡对蓄热效率 的影响, 结果可以为太阳能热水器、建筑节能和其 他领域的热能储存提供重要参考。

## 1 模型建立

#### 1.1 物理模型

本文中设计的蓄热装置采用套管式蓄热器,如 图 2 所示。外部圆筒的高度为 320 mm,外环直径 为 130 mm,内环直径为 25 mm<sup>[12]</sup>。环形空腔填充 PCM,用于传热管内和筒体之间的热量储存。本文 使用纯石蜡和加入 5%、10%、15%、20% 膨胀石墨 的膨胀石墨/石蜡复合 PCM<sup>[13]</sup>。传热管内流动的热 媒介水可以加热或冷却 PCM,而筒体外壁则包裹着 绝热材料。由于蓄热器进出口温度差距很小,设定 内环外壁面温度恒定为 343 K。所选用的相变储热 材料<sup>[4]</sup>和膨胀石墨<sup>[14]</sup>的物性参数,如表 1 所示。

#### 1.2 数学模型

当使用 ANSYS/Fluent 的凝固和熔化模型对相





图 2 套管式蓄热器物理模型 Fig. 2 Physical model of cased heat accumulator

	表 1 物性参数
Tab. 1	The physical property parameters

参数	膨胀石墨	石蜡	5%	10%	15%	20%
熔化温度, $T_m/\mathbb{C}$	2 000	52~53	57~58	54~56	47~50	43~45
潜热, L/(J·kg <sup>-1</sup> )	N/A	282 000	258 500	235 000	211 500	205 600
比热容, $c_p/[\mathbf{J}\cdot(\mathbf{kg}\cdot\mathbf{K})^{-1}]$	700	2 464	2 047	1 918	1 875	1 782
热导率, $\lambda/[W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$	1 500	0.14(l)	0.743(1)	1.458(l)	1.937(l)	2.589(1)
		0.28(s)	0.812(s)	1.568(s)	1.945(s)	2.673(s)
黏度, v/[kg·(m·s) <sup>-1</sup> ]	0.5	0.03(1)	0.03(1)	0.03(1)	0.03(1)	0.03(1)
		0.03(s)	0.03(s)	0.03(s)	0.03(s)	0.03(s)
密度, p/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 200	900	904	907	911	918

变蓄热单元进行数值模拟时,模型所依据的基本原理是焓法模型。然而,在相变蓄热过程中,相变传热模型非常复杂,为简化计算,需要进行以下理想化处理<sup>[15-17]</sup>:

(1) 假设石蜡在相变温度 (328 K) 时, 瞬间熔化, 不考虑过渡状态。

(2) 假设石蜡在相变温度下的物理性质保持不变,即密度、比热容和热导率等物理性质不随温度 变化而变化。

(3) 假设传热管内和简体之间的环形空腔中的 石蜡与环形空腔的简体之间为对流换热,即导热与 热对流同时存在。

(4)假设石蜡流动过程是层流的,不考虑湍流。

(5) 假设整个相变过程中系统处于稳态状态。

所用的控制方程如下:

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \qquad (1)$$

式中: u、v、w 分别为 PCM 沿 x、y、z 方向的流速, m/s。

上式中第2、3、4项为质量流密度(单位时间 内通过单位面积的流体质量)的散度,用矢量符号表 示为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \operatorname{div}\left(\vec{U}\right) = 0 \tag{2}$$

质量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$
(3)

简化后为

$$\operatorname{div}\left(\vec{U}\right) = 0 \tag{4}$$

动量守恒定律表述为微元控制体内流体的动量 对时间的变化率应等于外界作用在该微元控制体上 的各种力之和:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \vec{U}) = \operatorname{div}(\eta \operatorname{grad} u) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_u \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \vec{U}) = \operatorname{div}(\eta \operatorname{grad} v) - \frac{\partial P}{\partial y} + S_v \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w \vec{U}) = \operatorname{div}(\eta \operatorname{grad} w) - \frac{\partial P}{\partial z} + S_w \quad (7)$$

$$\operatorname{\vec{x}} \oplus : P \, \operatorname{\vec{x}} \, \operatorname{\vec{x}} \, \operatorname{\vec{x}} \, S_v \, \operatorname{\vec{x}} \, \operatorname{\vec$$

上述 3 个公式可简化为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \operatorname{div}\left(u\vec{U}\right) = \operatorname{div}\left(v\operatorname{grad} u\right) - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} \tag{8}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \operatorname{div}\left(v\vec{U}\right) = \operatorname{div}\left(v\operatorname{grad} v\right) - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y} \tag{9}$$

$$\frac{\partial v}{\partial v} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \operatorname{div}(w\vec{U}) = \operatorname{div}(v\operatorname{grad} w) - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} \quad (10)$$

式中:  $\rho$  为 PCM 的密度, kg/m<sup>3</sup>; t 为时间, s; p 为压强, Pa;  $\eta$  为流体的动力黏度, kg/(m·s); g 为重力加速度, 9.8 m/s<sup>2</sup>。

能量方程  
$$\frac{\partial(\rho_p h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_p u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_p v h)}{\partial y} =$$
div  $(\lambda_p \operatorname{grad} T_p) + S_p$  (11)

式中:

$$S_p = -\left(\frac{\partial(\rho\Delta H)}{\partial t} + \operatorname{div}\left(\rho \vec{u}\Delta H\right)\right) \qquad (12)$$

$$h = h_{\rm ref} + \int_{T_{\rm ref}}^{T} C_{p.P} \mathrm{d}T \tag{13}$$

式中: *h* 为 PCM 的显热焓; *H* 为 PCM 的潜热焓; *L* 为相变潜热;

$$\lambda_p = \lambda_{s.p} \cdot (1 - \varphi) + \lambda_{1.p}\varphi \tag{14}$$

为导热系数;

$$C_{p.P} = C_{p.P_s} \cdot (1 - \varphi) + C_{p.P_s} \varphi \tag{15}$$

为比热容。 $\lambda_{s.p}$  为固态 PCM 导热系数;  $\lambda_{1.p}$  为液态 PCM 导热系数;  $C_{p.P_s}$  为固态 PCM 比热容;  $C_{p.P_1}$  为 液态 PCM 比热容。

根据本文实际情况,按不可压缩、常物性和无 内热源流体流动进行化简后可得:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\lambda_p}{\rho_p} \operatorname{div}\left(\operatorname{grad} T_p\right) + S_p \quad (16)$$

式中

$$S_p = -\left(\frac{\partial\Delta H}{\partial t} + u\frac{\partial\Delta H}{\partial x} + v\frac{\partial\Delta H}{\partial y}\right)$$
(17)

#### 1.3 参数设置

(1) 模型选择。选择 3D 非稳态模型,选用
 Pressure-Based 求解法,将内管外壁简化为恒温壁
 面,雷诺数因流动方程设置为标准 k-ε 模型。

 (2) 材料设定。材料物性参数设置时不考虑 自然对流,石蜡的密度选择为 900 kg/m<sup>3</sup> < ρ <</li>
 907 kg/m<sup>3</sup>,比热和导热系数选用常量。本文所选肋 片材料为铝。 (3) 边界条件和初始条件。肋片的外壁设定为 耦合界面,圆管的外壁简化为恒温的 343 K,蓄热器 外筒壁为绝热壁面,肋片和 PCM 的初始温度设定为 303 K。

(4) 监视器设置。设置监视器观察 PCM 的平均 温度和液相分数。

(5) 算法及离散格式选定。采用 SIMPLE 算法进 行求解,两个修正系数均为默认值 1,压力、动量和 能量求解使用二阶迎风格式<sup>[18-21]</sup>。

### 2 相变蓄热过程数值模拟和结果分析

#### 2.1 模型验证

为了验证采用方法的可靠性与合理性,本文选 取了文献 [11] 中的一种工况进行模拟对比。该实验 所采用的 PCM 为石蜡,传热流体为水,入口温度为 70℃, PCM 初始温度为 30℃, PCM 的物性参数为 表 1 中 10% 膨胀石墨/石蜡复合 PCM。通过模拟对 测量的温度进行比较。

从图 3 可以看出相同位置的点,实验与模拟结 果曲线吻合度较高,数值相差不大,验证了本文采用 的模型是稳定、可靠的。





#### 2.2 网格无关性验证

为了获得更准确的结果,本文采用结构化网格 进行求解。使用 ICEM 软件进行网格划分,网格的 大小对计算结果至关重要。通常来说,网格尺寸越 小,数值计算结果越准确,收敛性越好。然而,减小 网格尺寸会增加网格的数量,从而增加计算时间,耗 费更多的计算资源。因此,在保证计算结果可靠的 前提下,需要尽可能地选择较少的网格数量,来得到 与网格划分无关的解。为了评估本文研究的套管式 相变蓄热器模型蓄热过程的网格独立性,进行了网 格独立性验证。

表 2 所示为不同网格数量 15% 膨胀石墨/石蜡 复合 PCM 进行模拟运算结果,可以观察到以下情况:当网格数为 422 094 时,运算相对流畅,但经常 出现发散现象,导致模拟难以进行。当网格数增加 到 639 936 时,运算时间增长,但过程没有发散现象。 然而,当网格数进一步增加到 827 730 时,运算出现 卡顿,计算速度极其缓慢。

基于以上观察,可知在保证计算结果可靠性的 前提下,选择网格数量为 639 936 是一个比较理想 的选择。这样可以在相对较短的时间内获得稳定 的模拟结果,而不会遭遇发散或严重的计算延迟 问题。

表 2 网格无关性验证 Tab. 2 Grid independence verification

	_
网格数量	PCM 完全熔化时间/s
827 730	17 100
639 936	16 705
422 094	—

#### 2.3 蓄热过程模拟

采用同心套管式蓄热器对其蓄热过程进行模拟,其中除了蓄热器填充的 PCM 不同外,其余参数均一样。其中热水入口温度为 343 K,速度为 1 m/s,初始温度为 303 K。图 4 所示为普通石蜡和加入5%、10%、15%、20% 膨胀石墨的膨胀石墨/石蜡PCM 在 50 s、1 000 s、5 000 s、15 000 s、20 000 s的



图 4 储能器内 PCM 熔化情况 (a) 纯石蜡, (b) 5% 膨胀石墨/石蜡, (c) 10% 膨胀石墨/石蜡, (d) 15% 膨胀石墨/石蜡, (e) 20% 膨胀石墨/石蜡

Fig. 4 Melting of the PCM in the energy reservoir (a) pure paraffin, (b) 5% expanded graphite/paraffin, (c) 10% expanded graphite/paraffin, (d) 15% expanded graphite/paraffin, (e) 20% expanded graphite/paraffin

熔化情况。由图 4 可见, 50 s 时各组 PCM 的熔化均 处于初始阶段,此时刚刚建立好稳定的温度场,在管 壁的外层的 PCM 逐渐达到熔点,贴近管壁的部分开 始熔化,在管壁和固态 PCM 间出现少量液体。当热 量传递到 1 000 s 时, PCM 开始大范围熔化,添加膨 胀石墨的复合 PCM 熔化程度均大于纯石蜡,随着膨 胀石墨质量分数的增加熔化程度也呈现增加趋势。 当热量传递到 5 000 s 时,随着 PCM 的熔化,传热方 式也由管壁对 PCM 的热传导变为液态 PCM 对固 态 PCM 的热对流,传热效率开始下降。此时,可以 明显看出随着膨胀石墨质量分数的增加,石蜡的熔 化程度明显的增加,其中添加 20% 质量分数膨胀石 墨的石蜡熔化程度最大。15 000 s 时,纯石蜡熔化了 13.96%,添加了 5%、10%、15% 膨胀石墨/石蜡分别 熔化了 32.3%、63.1% 和 93.3%,而添加 20% 膨胀石 墨/石蜡已完全熔化。20 000 s 时,普通石蜡熔化了 18.9%,15% 膨胀石墨/石蜡也完全熔化。由此可见, 膨胀石墨/石蜡的传热效率较纯石蜡明显提高。这主 要是由于膨胀石墨具有优异的热传导性能,大大改 善了材料的导热性,提高了传热效率。

#### 2.4 温度分析

在 Fluent 软件中设置监视窗口时分别设置距离 内管管壁中心位置为 15、30、45 mm 的 3 个点的温 度监视窗口, 以此来观察 PCM 熔化过程中温度的变 化, 该 3 点的温度折线图如图 5 所示。



图 5 储能器内 PCM 温度情况 (a) 纯石蜡, (b) 5% 膨胀石墨/石蜡, (c) 10% 膨胀石墨/石蜡, (d) 15% 膨胀石墨/石蜡, (e) 20% 膨胀石墨/石蜡

Fig. 5 Temperature of the PCM inside the energy reservoir (a) pure paraffin, (b) 5% expanded graphite/paraffin, (c) 10% expanded graphite/paraffin, (d) 15% expanded graphite/paraffin, (e) 20% expanded graphite/paraffin

由图 5 可知, PCM 的熔化过程可以分为 3 个阶段。在第 1 个阶段, 固态 PCM 吸收管壁传导的热量, 3 个测温点的温度逐渐上升, 这一阶段称为固态 PCM 的显热蓄热阶段。在第 2 个阶段, 3 个测温点的温度几乎不再上升, 这时的 PCM 达到了相变温度, 进入潜热蓄热阶段。在最后一个阶段, PCM 已经 熔化, 3 个测温点的温度开始缓慢上升, 慢慢接近内 管管壁温度, 这一阶段称为液态 PCM 的显热蓄热阶段。

通过数据和图片可以得出,普通石蜡在第1阶段需要18790s来完成蓄热,加入膨胀石墨后,5%膨胀石墨/石蜡蓄热时间缩短到4183s,20%膨胀石墨/石蜡蓄热时间缩短到1983s。在第2阶段,纯石蜡需要97457s来完成蓄热,添加膨胀石墨后,5%和20%膨胀石墨/石蜡的复合蓄热时间分别缩短到49089s、7967s。第3阶段,纯石蜡蓄热需要8153s,添加膨胀石墨后,蓄热时间都有不同程度的缩短。10%和20%膨胀石墨/石蜡的复合蓄热时间

分别缩短到 2 003 s、1 105 s。综合 3 个阶段, 添加膨 胀石墨的复合 PCM 蓄热速率明显高于纯石蜡, 其中 添加 20% 膨胀石墨的复合 PCM 的蓄热效率提升了 9 倍。随着膨胀石墨质量分数的增加, 蓄热效率的增 加程度逐渐降低, 这是因为随着膨胀石墨质量分数 的增加, 石蜡含量变少, 复合 PCM 的热导率提高, 潜 热略有降低。

#### 2.5 液相分数分析

为了进一步探究添加膨胀石墨的石蜡对蓄热速 率的影响,对其液相分数进行分析。使用 Fluent 体 积分数监测功能对 PCM 区域的熔化情况进行监测, 图 6 为 5 种 PCM 随时间变化的液相分数,图中的 5 组曲线斜率随膨胀石墨含量增加呈现增加的趋势。 开始阶段,PCM 区均为固态导热过程,液相分数为 0,随着温度不断升高,PCM 开始逐渐熔化,添加膨 胀石墨越多的 PCM 熔化越快。当 PCM 区域的液相 分数达到 100% 时,膨胀石墨/石蜡复合 PCM 熔化时 间分别是 57 274 s、27 555 s、16 705 s 和 11 055 s,纯 石蜡的熔化时间是 124 400 s,添加 20% 膨胀石墨/石 蜡的复合 PCM 熔化时间缩短为 113 345 s,约为普 通石蜡蓄热时间的 9%,大大提高蓄热效率。





由于膨胀石墨的导热系数较高,加入膨胀石墨 后对 PCM 的导热性能有较大改善,进而提高系统 蓄放热效率。但是当膨胀石墨的质量分数增加时, 复合 PCM 中石蜡成分逐渐降低,20% 膨胀石墨/石 蜡的复合 PCM 中石蜡的体积分数约降低到原来的 93%,复合 PCM 相变潜热相应降低。从而,降低了系 统的储能容量。在以膨胀石墨/石蜡为介质的储能系 统中,需在保持储能容量和提高系统蓄放热效率之 间进行综合评价。本文中 20% 膨胀石墨/石蜡能够 保持较高的储热容量并兼具高效的蓄放热性能,因 而可以在实用中采用。

## 3 结 论

采用有限元数值分析方法,以焓法模型对纯石 蜡与膨胀石墨/石蜡对套管式相变蓄热器蓄热速率 的影响进行相变蓄热单元数值模拟研究。观察管内 膨胀石墨/石蜡液相分数随时间变化情况,分析 PCM 的熔化云图和温度曲线图,发现套管式相变蓄热器 的热量传递具有阶段性,即固态 PCM 的显热蓄热 阶段、固态 PCM 的潜热蓄热阶段和液态 PCM 的 显热蓄热阶段。添加膨胀石墨会使复合 PCM 的蓄 热速率明显提升,且呈现随着膨胀石墨质量分数的 增加,储能器的传热效率有逐渐升高的趋势,添加 20% 膨胀石墨/石蜡的蓄热效率明显提高,蓄热时长 为 11 055 s,较纯石蜡蓄热时长缩短了 91%。但热导 率提高不与膨胀石墨/石蜡复合 PCM 中膨胀石墨含 量成比例。该研究对太阳能相变蓄热器的开发和相 关相变材料的应用研究具有参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 汪波,李朝前.全球可再生能源发展现状及趋势 [J].中 国物价, 2018(5): 44-47.
- [2] 陈伟, 郭楷模, 岳芳. 国际能源科技领域新进展与启示 建议[J]. 世界科技研究与发展, 2019, 41(2): 172-181.
- [3] JIANG J Z, CHEN Z J, BO L, et al. Study on heat transfer enhancement of solar finned tube phase change regenerator [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. UK: IOP Publishing, 2020, 615(1): 012070.
- [4] WANG C, WANG S Y L, CHENG X X, et al. Research progress and performance improvement of phase change heat accumulators [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 56: 105884.
- [5] LEI J, TIAN Y, ZHOU D, et al. Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage using copper foams with varying porosity [J]. Solar Energy, 2021, 221: 75-86.
- [6] BUONOMO B, MANCA O, NARDINI S, et al. Numerical study on latent heat thermal energy storage system with PCM partially filled with aluminum foam in local thermal equilibrium [J]. Renewable Energy, 2022, 195: 1368-1380.
- [7] GHALAMBAZ M, MEHRYAN S A M, VEISMORADI A, et al. Melting process of the nano-enhanced phase change material (NePCM) in an optimized design of shell and

tube thermal energy storage (TES): Taguchi optimization approach [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 193: 116945.

- [8] 华维三,章学来,罗孝学,等.纳米金属/石蜡复合相
   变蓄热材料的实验研究 [J].太阳能学报,2017,38(6):
   1723-1728.
- [9] LIU J S, YU Y Y, HE X. Research on the preparation and properties of lauric acid/expanded perlite phase change materials [J]. Energy and Buildings, 2016, 110: 108-111.
- [10] ZHANG S, YAO Y P, JIN Y G, et al. Heat transfer characteristics of ceramic foam/molten salt composite phase change material (CPCM) for medium-temperature thermal energy storage [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 196: 123262.
- [11] WANG J F, XIE H Q, GUO Z X. First-principles investigation on thermal properties and infrared spectra of imperfect graphene [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 116: 456-462.
- [12] 陈正佳. 太阳能相变蓄热器强化传热特性研究 [D]. 石 家庄: 河北科技大学, 2021.
- [13] YU X K, TAO Y B. Preparation and characterization of paraffin/expanded graphite composite phase change materials with high thermal conductivity [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 198: 123433.
- [14] WANG J F, XIE H Q, XIN Z. Investigation on microstructure and thermal properties of graphene-

nanoplatelet/palmitic acid composites [J]. Journal of Nanoparticle Research, 2012, 14(7): 952.

- [15] 郭昕. 一种水平套管相变单元的传热强化研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [16] 郭梦雪. 套管式相变蓄热器内管排列方式和壁温的影响 [J]. 煤气与热力, 2019, 39(5): 1-7.
- [17] 朱孟帅,张华,闫勤学,等.泡沫金属填充率对相变材料 强化换热的机理研究 [J].制冷学报,2021,42(5):127-133.
- [18] KIRINCIC M, TRP A, LENIC K. Numerical evaluation of the latent heat thermal energy storage performance enhancement by installing longitudinal fins [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: 103085.
- [19] LI W, WANG J, ZHANG Y L, et al. Numerical study and parametric analysis on performance enhancement of a latent heat storage unit with fractal fins [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 886-897.
- [20] SUBRAMANIAM S B, SENTHIL R. Heat transfer enhancement of concentrated solar absorber using hollow cylindrical fins filled with phase change material [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(43): 22344-22355.
- [21] MAO Q J, HU X L, LI T. Study on heat storage performance of a novel vertical shell and multi-finned tube tank [J]. Renewable Energy, 2022, 193: 76-88.

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

简 讯

## 我校荣获两项 2023 年中国商业联合会科技奖

近日,中国商业联合会对 2023 年中国商业联合会科技奖拟授奖项目进行公示,我校首次荣获两项该领 域奖项。由我校徐海萍教授领衔团队牵头、联合上海睿聚环保科技有限公司申报的"高值化再生利用废弃塑 料产品研发及产业化"荣获全国商业科技进步奖三等奖,工程训练与创新教育中心朱文华教授荣获全国商业 科技创新人物奖。

中国商业联合会科学技术奖旨在表彰在全国商业行业科学研究、技术创新、成果推广、高新技术产业化 中做出突出贡献的单位和个人,以此推动商业行业科技进步。此次获奖是对学校近年来坚持走"应用导向,技 术创新"发展道路的充分肯定和认可,学校将持续推动教师与领域重点企业建立紧密的产学研深度合作,承 接企业技术难题和关键共性问题,助力产品研发及产业化应用,为推动传统产业转型升级和高新技术产业发 展发挥重要支撑作用。学校也将进一步拓展信息渠道,鼓励广大教师积极申报各级各类科技奖项,不断提升 科学研究的社会行业影响力。