

复合相变材料导热性能与套管式相变储热单元翅片结构优化

鲍伟, 王胜捷*, 蒲万兴, 宋子豪

(内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010000)

摘要: 针对套管式相变储热单元储热效率较低的问题, 从相变材料及翅片结构两方面进行优化。将石蜡、月桂酸、硬脂酸三种有机相变材料混合, 在总体积一定时, 改变三种相变材料的体积分数制备混合有机相变材料, 选出一种导热系数最高的组合。然后, 将不同质量分数的 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Fe 、 Cu 纳米颗粒与有机相变材料掺杂, 制备出多种复合相变储热材料。结果表明, 添加 1.5% Cu 纳米颗粒的复合相变材料导热系数最高, 为 $0.374 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 与不添加纳米 Cu 的样品相比, 导热系数提高了 14.37%。基于先前学者对套管典型翅片结构的研究分析, 将翅片归纳为 4 种基础形状: 三角形、平行四边形、矩形、扇形, 基于相同工况且翅片体积与储热材料体积比相同, 换热边长相等的的前提下, 对上述 4 种形状的传热性能进行了数值模拟, 发现扇形结构熔化速率较高, 因此提出了一种弧形翅片与直翅片组合的结构, 针对该翅片结构的储热装置使用 FLUENT 软件进行了三维数值模拟研究, 基于该模型采用无量纲量拟合了熔化时间与斯蒂芬 (Ste) 数的关系函数。研究结果可为提高相变储热单元的储热效率提供参考。

关键词: 结构优化; 数值模拟; 套管式储热单元; 相变储热

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406221

中图分类号: TK02

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-23-0303-10

鲍伟, 王胜捷, 蒲万兴, 等. 复合相变材料导热性能与套管式相变储热单元翅片结构优化[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 303-312. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406221 <http://www.tcsae.org>

BAO Wei, WANG Shengjie, PU Wanxing, et al. Thermal conductivity of composite phase change materials to optimize fin structure of casing heat storage unit[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(23): 303-312. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406221 <http://www.tcsae.org>

0 引言

储热技术可以有效的解决热能在时空分布及强度上不匹配的矛盾, 在一定程度上减少了能源的浪费, 提高了能源的利用率, 因此得到了广泛的应用^[1-3]。储热方式主要有 3 种: 显热储热、相变储热、热化学储热^[4]。其中相变储热是利用相变材料 (phase change material, PCM) 在相变过程中吸收或放出热量来实现能量的储存和释放, 由于相变材料的焓值较大并且其相变温度范围较窄, 因而相变储热的能量密度较大, 而且过程接近恒温, 易于调控, 所以相变储热具有良好的发展前景, 是该领域的研究热点。

相变材料具有相变温度范围合适、相变潜热大、几乎无过冷度、无毒无腐蚀性、价格便宜等优点, 但导热系数较低限制了其在蓄热系统中的应用^[5]。目前提升储热单元换热性能的研究主要集中在两个方向, 第一个方向是发展高导热的复合相变材料, 比如将纳米粒子添加到传统相变材料中形成纳米复合相变材料, 根据现有研究, 使用的纳米颗粒有 Al_2O_3 ^[6-7]、 Fe_3O_4 ^[8]、 Ag ^[9]、 ZnO ^[10]、

MgO ^[11]、 Fe_2O_3 ^[12]、 Cu ^[13]、 TiO_2 ^[14]、 SiO_2 ^[15] 等, 其具有强化相变材料传热、提升储热系统效率的作用^[16-17]。华维三等^[18] 添加不同质量分数的纳米铁与石蜡形成复合相变材料, 发现随着纳米铁质量分数的增加, 复合材料的导热系数逐渐增大, 当纳米铁质量分数为 0.1% 时, 复合材料的固态导热系数可增大 2.8 倍。KARTHIKEYAN 等^[19] 制备了癸酸-肉豆蔻酸二元共晶混合物作为相变材料, 添加 1% 质量分数的银石墨烯纳米薄片发现熔化导热系数提升了 18.52%, 复合材料具有热循环可靠性。周艳等^[20] 采用差示扫描量热仪对添加了不同质量分数纳米颗粒的正十八烷复合相变材料的相变潜热及相变温度进行了试验研究, 发现纳米复合材料的潜热略低于正十八烷, 且随纳米金属粒子质量分数的增大而减小, 但其相变温度变化不大。第二个方向是优化储热系统的结构来增强换热, 由于计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 的飞速发展, 研究人员越来越青睐于通过 CFD 模拟分析不同翅片结构对储热单元热性能的影响。许泽等^[21] 提出了一种新型分形翅片改善潜热储热系统的相变传热特性, 发现与直翅片相比, 分形翅片显著强化了系统的换热性能。陈晓宇^[22] 对纵向矩形、锥形和 T 形翅片换热结构与光管 (无翅片) 换热结构分别进行数值模拟研究, 发现新型 T 形翅片结构传热性能最佳。于德涛^[23] 研究了应用 Y 形翅片对相变过程的促进作用, 并与直翅片进行对比后发现应用 Y 形翅片拓展了换热面积且增加了热流

收稿日期: 2024-06-30 修订日期: 2024-10-20

基金项目: 内蒙古自然科学基金联合面上项目 (2023LHMS05047); 内蒙古工业大学博士科研启动金项目 (DC2100000956)

作者简介: 鲍伟, 研究方向为相变储热。Email: 2237610559@qq.com

※通信作者: 王胜捷, 博士, 副教授, 研究方向为可再生新能源利用开发技术及能源高效利用。Email: Wsj900554@163.com

通道, 提高外壁处 PCM 的温度响应速度和热穿透深度。刘斐^[24]分析了矩形翅片的长度、翅片数目和环形翅片的半径对凝固和熔化过程的影响, 发现随着翅片长度增加, 储放热时间随之减小。且当矩形翅片连通两侧传热壁面时对储放热时间缩短更有利, 储放热过程所需的时间随环形翅片半径的增大呈先减小后增加的趋势。毛前军^[25]提出了一种分叉形状的翅片来提高储热性能, 发现在不改变翅片体积的前提下, 增加翅片的数量可以减少相变材料的熔化时间, 提高平均储热速率。李芄等^[26]在储热装置添加纵向直肋来提升换热性能, 发现添加翅片后与光管相比熔化时间缩短了 4 倍。刘立君等^[27]基于管壳式储热单元选择了矩形翅片、Y 型翅片、分型翅片进行对比, 发现偏心分型翅片强化效果最佳。张学永等^[28]提出了一种雪花型翅片, 并在同一换热流体流动条件下, 与纵向翅片进行对比, 发现雪花型翅片显著提高了储热单元的换热效率和温度均匀性。林道光等^[29]采用 FLUENT 软件对套管相变蓄热器蓄热特性进行模拟研究, 发现翅片个数、高度和厚度的增加都能起到强化换热的效果, 但强化换热效果会渐趋平缓。

基于前人的研究, 本文首先制备了多种复合相变储热材料, 并对样品进行了热性能的测试, 选出导热系数较佳的储热材料。其次提出了一种弧形翅片与直翅片组合的结构, 针对该翅片结构的储热装置使用 FLUENT 软件进行了三维数值模拟研究。研究了不同斯蒂芬 (*Ste*) 数对套管储热单元的性能影响, 最后进行了相变储热单元的平台试验, 研究结果可为提高相变储热单元的储热效率提供参考。

1 纳米复合相变材料制备试验

1.1 试验材料及试验仪器

本研究通过混合 3 种有机相变材料, 即石蜡 (paraffin wax, PW)、月桂酸 (lauric acid, LA)、硬脂酸 (stearic acid, SA), 在保持体积不变的情况下调整各自的体积比例, 对这些混合物的热物性进行了测试, 以确定最佳的材料组合。此外, 通过向有机相变材料中添加不同含量的 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、Fe、Cu 等纳米颗粒, 制备出多种复合相变储热材料。对这些复合材料的熔点和导热系数等传热性能参数进行测试, 选择出一种性能表现较佳的复合相变材料。

试验中采用的石蜡相变温度为 $64\sim 66\text{ }^\circ\text{C}$, 月桂酸相变温度为 $44\text{ }^\circ\text{C}$, 硬脂酸相变温度为 $67\sim 72\text{ }^\circ\text{C}$, 十二烷基苯磺酸钠 (sodium dodecyl benzene sulfonate, SDBS) 由天津登峰化学试剂有限公司提供。4 种纳米颗粒分别为纯度 99.99% 的纳米氧化铝粉、纳米氧化铁粉、纳米铁粉、纳米铜粉。

本文制备纳米复合相变材料采用的实验仪器有电子天平、数显恒温水浴锅、双数显恒温磁力搅拌器、超声波细胞粉碎机, 采用热常数分析仪测试复合相变材料的导热系数。

1.2 试验过程

试验采用熔融共混法制备了 PW/LA/SA 三元复合

PCM。具体步骤如下: 首先用电子天平称取一定质量的固体 PW/LA/SA 加入烧杯中, 在 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温水浴中加热, 直至三元复合相变材料完全熔化。随后, 在液体 PCM 中添加了预定质量的表面活性剂 (SDBS), 并使用磁力搅拌器进行 30 min 的搅拌, 以确保各组充分混合。接着, 精确称量所需质量的纳米颗粒, 将其加入烧杯中, 并继续搅拌 30 min, 旨在提升混合溶液的均匀性。之后, 将含有混合溶液的烧杯置于超声波细胞粉碎机中, 进行 1 h 的超声处理。最后, 将制备完成的液态复合 PCM 从超声波细胞粉碎机中取出, 并在室温下静置, 使其自然冷却成型, 得到 PW/LA/SA 三元复合 PCM 并用于后续表征。重复上述步骤, 分别制备出不同质量分数的复合 PCM。

1.3 PW/LA/SA 三元复合相变材料导热性能分析

由于三元复合相变材料的配比组合繁多, 为了减少试验次数, 通过查阅文献确定了月桂酸与硬脂酸的最佳比例为 75.5: 24.5^[30-32], 在保持月桂酸与硬脂酸的配比为 75.5: 24.5 的前提下, 加入了 9 组不同比例的石蜡与之融合, 制备出 PW/LA/SA 三元复合相变材料来改善原有相变材料的导热系数。

为了研究不同比例的 PW/LA/SA 三元复合相变材料对导热性能的影响, 通过瞬态平面热源法对 9 组比例的三元样品进行了测试, 测量 5 次导热系数并取平均值。

如表 1 所示, 将 9 组配比的三元复合相变材料样品分别定义为 1~9。1~9 的导热系数分别为 0.215、0.303、0.313、0.299、0.288、0.284、0.278、0.149、0.148 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 其中样品 3 的导热系数最大为 0.313 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 与其余 8 组配比的样品相比, 导热系数提高了 45.6%、3.3%、4.7%、8.7%、10.2%、12.6%、110.1%、111.5%, 选择样品 3 作为三元复合相比材料的配比并与纳米金属颗粒混合进行下一步的研究。

表 1 三元样品的导热系数
Table 1 Thermal conductivity of a ternary sample

样品 Sample	样品配比 (PW: LA: SA) Sample ratio (PW: LA: SA)	导热系数 Thermal conductivity/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
1	10.00: 67.95: 22.05	0.215
2	20.00: 60.40: 19.60	0.303
3	30.00: 52.85: 17.15	0.313
4	40.00: 45.30: 14.70	0.299
5	50.00: 37.75: 12.25	0.288
6	60.00: 30.20: 9.80	0.284
7	70.00: 22.65: 7.35	0.278
8	80.00: 15.10: 4.90	0.149
9	90.00: 7.55: 2.45	0.148

注: PW 为石蜡, LA 为月桂酸, SA 为硬脂酸。

Note: PW is paraffin, LA is lauric acid, and SA is stearic acid.

1.4 不同纳米复合相变材料导热性能分析

在保持样品 3 配比的前提下, 添加不同的纳米颗粒 (Al_2O_3 、Fe、 Fe_2O_3 、Cu) 和有机材料进行掺杂, 制备出纳米强化复合相变材料来提高原有 PCM 的导热性能。

为了研究不同纳米颗粒制备的 PW/LA/SA 纳米强化复合相变材料对导热性能的影响, 通过瞬态平面热源法对 4 组纳米颗粒的三元样品进行了测试, 测量 5 次导热系数并取平均值。

如图 1 所示, 当三元复合相变材料不添加纳米颗粒即样品 3 时, 材料的导热系数为 $0.313 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 随着添加纳米颗粒后, 导热系数呈现上涨趋势, 当添加 0.5% 的 Al_2O_3 、 Fe 、 Fe_2O_3 、 Cu 纳米颗粒后, 导热系数分别为 0.335 、 0.343 、 0.345 、 $0.358 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 相较于样品 3 分别提高了 7.03% 、 9.58% 、 10.22% 、 14.38% , 其中添加纳米 Cu 制备的纳米复合相变材料样品的导热系数显著提高, 这主要归功于 Cu 本身卓越的导热性能。铜的晶格结构紧凑, 原子间距较短, 有利于热能在原子间的传递。另一方面, 铜的自由电子数量较多, 它们在晶格结构中迅速迁移, 促进了热量的快速分布。这些因素共同作用, 为纳米复合相变材料构建了高效的热传导通道, 有效提升了材料的热传递速率。选取添加 $0.5\%\text{Cu}$ 的复合相变材料进行下一步的研究。

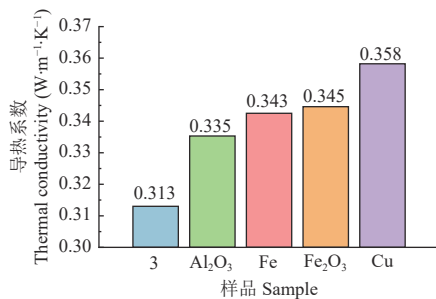


图 1 纳米复合相变材料样品的导热系数

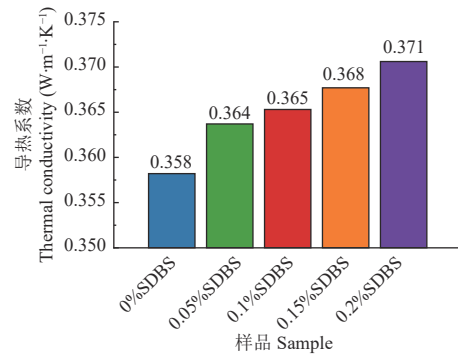
Fig.1 Thermal conductivity of nanocomposite phase change material samples

1.5 不同比例分散剂纳米复合相变材料导热性能分析

在保持 $0.5\%\text{Cu}$ 的复合相变材料样品前提下, 选取了 4 种不同比例 (0.05% 、 0.1% 、 0.15% 、 0.2%) 的十二烷基苯磺酸钠作为分散剂来克服纳米颗粒在有机液体中的快速聚集和沉淀, 使复合相变材料中的纳米颗粒分散均匀。

为了研究不同比例分散剂对制备的 PW/LA/SA 纳米强化复合相变材料导热性能的影响, 通过瞬态平面热源法对 4 组添加分散剂的纳米颗粒三元样品进行了测试, 测量 5 次导热系数并取平均值。

如图 2 所示, 当 $0.5\%\text{Cu}$ 纳米复合相变材料样品不添加分散剂时, 样品导热系数为 $0.358 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 随着分散剂的量逐渐增加, 导热系数逐渐增加, 当分散剂的比例为 0.05% 、 0.1% 、 0.15% 、 0.2% 时, 导热系数分别为 0.364 、 0.365 、 0.368 、 $0.371 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 相较于不添加分散剂的样品提高了 1.68% 、 1.96% 、 2.79% 、 3.63% 。显然, 分散剂的加入对提升纳米复合相变材料的导热系数具有积极作用。这是因为直接向相变材料中掺入纳米颗粒可能会引起颗粒的团聚, 而分散剂能够有效地减轻这种团聚现象, 此时材料形成不均匀并且热网络发生破裂从而降低了整体的热效率, 团聚是热效率降低的主要原因, 添加分散剂有助于纳米颗粒分散均匀, 减少 PCM 基质中的空隙空间来显著提高基体 PCM 的导热性。选取添加 $0.2\%\text{SDBS}$ 的复合相变材料进行下一步的研究。



注 (Note): SDBS sodium dodecyl benzenesul fonate

图 2 不同比例分散剂纳米复合相变材料的导热系数

Fig.2 Thermal conductivity of dispersant nanocomposite phase change materials with different proportions

1.6 不同重量分数 Cu 纳米复合相变材料导热性能分析

在保持 $0.2\%\text{SDBS}$ 的复合相变材料样品前提下, 选取了 4 种不同质量分数 (0.5% 、 1% 、 1.5% 、 2%) 的纳米 Cu 作为添加剂来改善原有 PCM 导热系数低的缺点, 使材料的导热性能进一步提高。

为了研究不同重量分数的纳米 Cu 对制备的 PW/LA/SA 纳米强化复合相变材料导热性能的影响, 通过瞬态平面热源法对 4 组添加纳米 Cu 的三元样品进行了测试, 测量 5 次导热系数并取平均值, 样品实物图如图 3 所示。

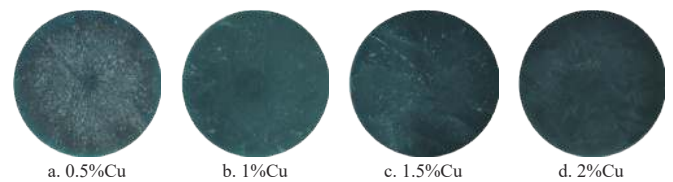


图 3 不同质量分数 Cu 纳米复合相变材料样品图

Fig.3 Sample plots of Cu nanocomposite phase change materials with different weight fractions

如图 4 所示, 当 $0.2\%\text{SDBS}$ 纳米复合相变材料样品不添加纳米 Cu 时, 样品导热系数为 $0.327 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 随着纳米 Cu 质量分数的不断增加, 导热系数逐渐增加, 当纳米 Cu 的质量分数为 0.5% 、 1% 、 1.5% 、 2% 、 2.5% 时, 导热系数分别为 0.371 、 0.373 、 0.374 、 0.370 、 $0.368 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 相较于不添加纳米 Cu 的样品提高了 13.46% 、 14.07% 、 14.37% 、 13.15% 、 12.54% , 显然添加纳米 Cu 颗粒有助于提高纳米复合相变材料的导热系数, 这是因为 Cu 固有导热系数非常高。

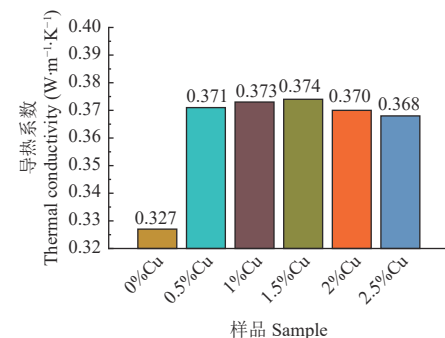


图 4 不同质量分数 Cu 样品的导热系数

Fig.4 Thermal conductivity of Cu samples with different mass fractions

此外,铜的晶格结构使其原子之间的平均距离较小,这使得热量更容易在铜原子之间传递。另一方面铜的自由电子数量较多,这些自由电子在晶格结构中快速移动,将热量从一部分传递到另一部分。因此在纳米复合相变材料中提供了高效的传热路径,从而加快传热速度。可以发现当添加 1.5%Cu 时复合材料的导热系数达到了最大为 0.374 W/(m·K),此时导热系数出现了拐点,表明复合 PCM 的导热系数随纳米 Cu 质量分数的增长趋势减缓,并出现了负面作用,产生这种现象的原有可能是纳米颗粒添加过量导致了团聚效应,另一方面纳米颗粒过多会使复合相变材料的粘性增加,从而降低了整体的热效率。

2 相变储热单元相变过程模拟分析

2.1 物理模型

图 5a 为 4 种翅片基础形状的示意图,图 5b 和图 5c 分别为 4 种基础形状翅片二维和三维熔化数值模拟的液相率变化图,如图所示在相同的加热温度条件下,扇形的熔化速率要优于其余 3 种图形,在此基础上设计了一种弧形翅片与传统的直翅片组合来提高储热单元的换热效率。

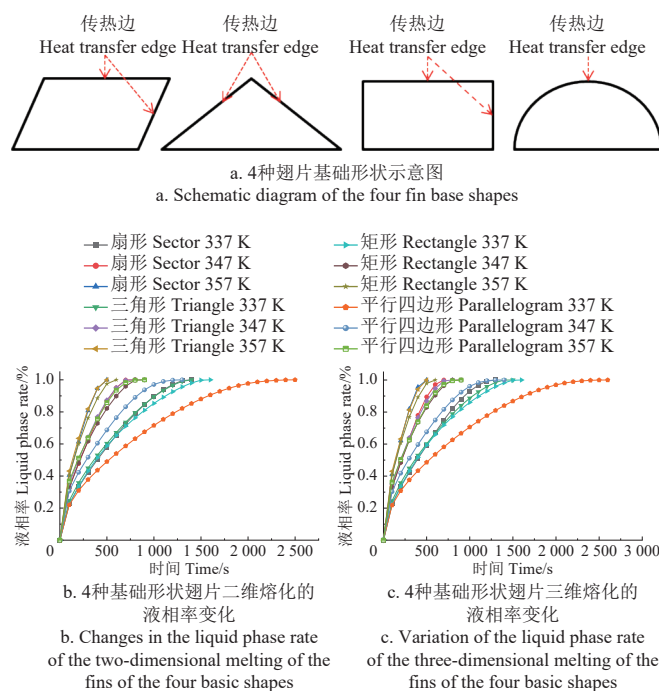


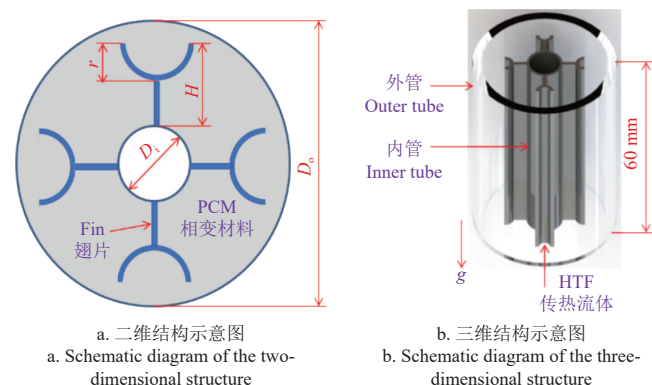
图 5 基础形状翅片熔化的液相率变化

Fig.5 Change in the liquid phase rate of the melting of the base shape fin

本研究最终的套管式相变储热单元模型如图 6 所示,玻璃外壳直径为 40 mm,传热流体 (heat transfer fluid, HTF) 管为不锈钢钢管,其直径为 10 mm,外管厚度为 2.5 mm,内管厚度为 0.75 mm,套管式相变储热器高度为 60 mm。在传热流体管内流动的导热流体为水,四组弧形翅片与直翅片均匀布置在内管周围,将 PCM 填充到管壳和翅片之间的空隙中,当套管式相变储热器进行储热过程时,高温水的流动方向为自下而上,高温水在流动过程中将携带的热量传递到传热流体管进而传递

到 PCM 中进行储存,通过加热管内的 HTF 来完成 PCM 的熔化过程。

本研究中采用的 PCM 为石蜡,模型外壳为亚克力玻璃,内管和翅片均采用不锈钢材质,HTF 为液态水,各种材料的物性参数如表 2 所示。



注: D_o 为外管直径, D_i 为内管直径, H 为翅片高度, r 为弧形翅片半径, g 为重力加速度。
Note: D_o is the diameter of the outer tube, D_i is the diameter of the inner tube, H is the height of the fin, r is the radius of the arc fin, and g is the acceleration due to gravity.

图 6 储热单元结构图

Fig.6 Structure diagram of the heat storage unit

表 2 材料的物性参数

物理参数 Physical property parameters	石蜡 Paraffin wax	水 Water	玻璃 Glass	不锈钢 Stainless steel
密度 Density / (kg·m ⁻³)	800.0	998.2	1 190	8 030
比热容 Specific heat capacity / (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	2	4.182	1.464	0.5
热导率 Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.2	0.6	0.19	16.27
黏度 Viscosity / (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.003 650	0.001 003		
热膨胀系数 Coefficient of thermal expansion / K ⁻¹	0.000 308			
相变潜热 Latent heat of phase change / (kJ·kg ⁻¹)	200			
相变温度 Phase change temperature / K	327			

2.2 传热管导热控制方程

传热管 (包括中心管、翅片以及储热单元外壳) 导热满足傅里叶导热定律,传热管内无热源,假设传热管的物性为常数,那么传热管导热的控制方程为

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \nabla^2 T_s \quad (1)$$

式中 ρ_s 为传热管的密度, kg/m³; c_s 为传热管的比热容, J/kg; t 为时间, s; T_s 为传热管的温度, K; k_s 为传热管的导热系数, W/(m·K); ∇^2 为拉普拉斯算子。

2.3 传热流体单相控制方程

从太阳能集热器流出的传热流体始终保持单相状态,将热量通过中心管和翅片传递至相变材料,为单相强制对流传热。在当前研究工况中,传热流体的 Re 数均小于 2 300,为层流流动,因此其控制方程满足纳维-斯托克斯方程,具体为

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho_H}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_H \vec{V}_H) = 0 \quad (2)$$

式中 ρ_H 为传热流体的密度, kg/m^3 ; ∇ 为哈密顿算子; $\vec{V}_H$ 为传热流体的速度, m/s 。

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho_H \vec{V}_H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_H \vec{V}_H \vec{V}_H) &= \rho_H \vec{g} - \nabla p_H \\ + \nabla \cdot \left(-\frac{2}{3} \mu_H \nabla \cdot \vec{V}_H \right) &+ \nabla \cdot (2\mu_H S_H) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\vec{V}_H \vec{V}_H$ 为并矢表示的二阶张量; $\vec{g}$ 为重力加速度矢量, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$; p_H 为传热流体的压力, Pa ; μ_H 为传热流体的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; S_H 为传热流体的变形率张量, s^{-1} 。

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_H h_H) + \nabla \cdot (\rho_H \vec{V}_H h_H) = \frac{D\rho_H}{Dt} + \nabla \cdot (k_H \nabla T_H) + \phi_H \quad (4)$$

式中 h_H 为传热流体焓, J/kg ; $\frac{D}{Dt}$ 为全微分; k_H 为传热流体的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T_H 为传热流体的温度, K ; ϕ_H 为耗散函数, W/m^3 。

2.4 相变材料控制方程

相变区域在固液相变传热过程中随着时间逐渐变化, 从而形成固相区、液相区和糊状区三块区域。糊状区的相变材料是处于固态和液态的过渡状态, 液相分数介于 0~1 之间。本文基于凝固-熔化模型 (solidification and melting) 描述糊状区流动与传热过程, 该模型将糊状区处理成伪多孔介质区域 (或混合相), 当孔隙率为 1 时认为是全液相, 此时液相分数为 1; 当孔隙率为 0 时, 认为是全固相, 糊状区流速亦为 0, 此时液相分数为 0。同时该模型做了如下假设: 1) 认为糊状区相变材料为层流流动的牛顿流体; 2) 糊状区相变材料的热物性呈现各向同性; 3) 忽略糊状区相变材料液相过冷等场小扰动的影响; 4) 固液界面处于热力学平衡状态; 5) 忽略了黏性耗散项和压力做功项。因此, 糊状区控制方程可以写为

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho_M}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_M \vec{V}_M) = 0 \quad (5)$$

式中 ρ_M 为糊状区相变材料的密度, kg/m^3 ; $\vec{V}_M$ 为糊状区相变材料的速度, m/s 。

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho_M \vec{V}_M)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_M \vec{V}_M \vec{V}_M) &= \rho_M \vec{g} - \nabla p_M + \nabla \cdot (2\mu_M S_M) + \vec{S}_M \\ &\quad (6) \end{aligned}$$

式中 $\vec{V}_M \vec{V}_M$ 为并矢表示的二阶张量; p_M 为糊状区相变材料的压力, Pa ; μ_M 为糊状区相变材料的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; S_M 为糊状区相变材料的变形率张量, s^{-1} ; $\vec{S}_M$ 为由于糊状区相变材料的凝固/熔化产生的动量源项, N/m^3 。

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_M h_M) + \nabla \cdot (\rho_M \vec{V}_M h_M) = \nabla \cdot (k_M \nabla T_M) + S_h \quad (7)$$

式中 h_M 为糊状区相变材料的焓, J/kg ; k_M 为糊状区相变材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T_M 为糊状区相变材料的温度, K ; S_h 为由于糊状区相变材料的凝固/熔化产生的能量源项, W/m^3 。

上述糊状区相变材料控制方程中包含了糊状区热物性、速度、焓值、动量源项以及能量源项等未知量, 因而需要补充相关方程使控制方程组封闭。首先给出糊状区相变材料的热物理性质混合法则。

糊状区相变材料的密度:

$$\rho_M = \rho_L \beta + \rho_S (1 - \beta) \quad (8)$$

式中 ρ_L 为相变材料液相的密度, kg/m^3 ; β 为相变材料的液相质量分数, 由式 (9) 定义; ρ_S 为相变材料固相的密度, kg/m^3 。

$$\beta = \begin{cases} 0, & T_M < T_S \\ \frac{T_M - T_S}{T_L - T_S}, & T_S \leq T_M \leq T_L \\ 1, & T_M > T_L \end{cases} \quad (9)$$

式中 T_S 为相变材料固相的温度, K ; T_L 为相变材料液相的温度, K 。

糊状区相变材料的动力黏度:

$$\mu_M = \mu_L \beta + \mu_S (1 - \beta) \quad (10)$$

式中 μ_L 为相变材料液相的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_S 为相变材料固相的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

糊状区相变材料的导热系数:

$$k_M = k_L \beta + k_S (1 - \beta) \quad (11)$$

式中 k_L 为相变材料液相的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; k_S 为相变材料固相的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

糊状区相变材料的焓:

$$h_M = h_{ref} + (1 - \beta) \int_{T_{ref}}^{T_M} c_S dT_M + \beta \int_{T_{ref}}^{T_M} c_L dT_M + \beta L \quad (12)$$

式中 h_{ref} 为相变材料的参考焓, J/kg ; T_{ref} 为相变材料的参考温度; c_S 为相变材料固相的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; c_L 为相变材料液相的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; L 为相变材料的熔化潜热, J/kg 。

动量源项:

$$\vec{S}_M = \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} \vec{V}_M \quad (13)$$

式中 ε 是一个很小的常数, 为防止被 0 整除而设为 0.001; A_{mush} 为糊状区常数。

能量源项:

$$S_h = \frac{\partial (\rho_M \delta h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_M \vec{V}_M \delta h) \quad (14)$$

式中 δh 为糊状区相变材料所需的焓, J/kg 。

$$\delta h = \int_0^{T_M} (c_L - c_S) dT_M + L \quad (15)$$

2.5 边界和初始条件设置

HTF 加热温度设为 342 K, 比 PCM 熔点高 15 K。外管壁采用绝热边界, 内管与 PCM、翅片与 PCM 的界面设为耦合壁边界条件, PCM 初始温度设置为 300 K, 低于熔点, 以保证整个计算域中 PCM 的固相。

2.6 Ste 数对套管式相变储热单元储热过程的影响分析

为了研究 HTF 入口温度对相变储热单元熔化过程的影响, 本文使用斯蒂芬 (Ste) 数对 HTF 入口温度进行了无量纲化, 具体有 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 这 5 种 Ste 数, Ste 数的表达式为

$$Ste = \frac{C_p(T_i - T_0)}{L} \quad (16)$$

式中 C_p 是 PCM 的比热容; T_i 是 i 时刻 PCM 的平均温度; T_0 是 PCM 初始温度。

图 7a 为不同 Ste 数对应的液相率变化曲线图, 从图中可以看出不同 Ste 数对应的熔化时间差异较大, 当 Ste 数从 0.3 变为 0.7 时, 熔化时间由 7 207 s 减少到 904 s, 整个熔化时间缩短了 6 303 s。原因在于 Ste 数为 0.3 时, 传热流体进入内管向储热单元所传递的热量未达到 HTF 向内管传热时所需要的最大热流量, 即 Ste 数为 0.3 时钢管不能充分发挥其优良的导热性能, 当 Ste 数为 0.7 时, 此时 HTF 与 PCM 的温差达到最大, 自然对流尤为剧烈, 进一步加速了储热单元的熔化过程。从图中可以发现 Ste 数越小, 其熔化速率增长的趋势越慢, 随着 Ste 数的增长, 各个工况的熔化速率差距越来越小, 当 Ste 数由 0.3 增大到 0.4 时, 两者的熔化时间差距最大, 缩短了 4 864 s; 而当 Ste 数由 0.6 增长到 0.7 时, 其熔化时间仅减少了 211 s, 不同阶段的熔化时间差异非常显著, 可以得出增大 HTF 的入口温度对熔化速率有非常明显的提升, 随着温度的提高对熔化过程的促进作用逐渐减弱。图 7b 为不同 Ste 数对应的熔化时间, 由五种 Ste 数的熔化时间曲线可以发现基本符合指数函数规律, 拟合了 Ste 数的变化和 PCM 完全熔化时间 $\tau_{\beta=1}$ 的函数为 $\tau_{\beta=1} = 5.07 \times 10^5 \times e^{-14.682Ste} + 1\,005$, 从图中可以看出拟合效果较好。

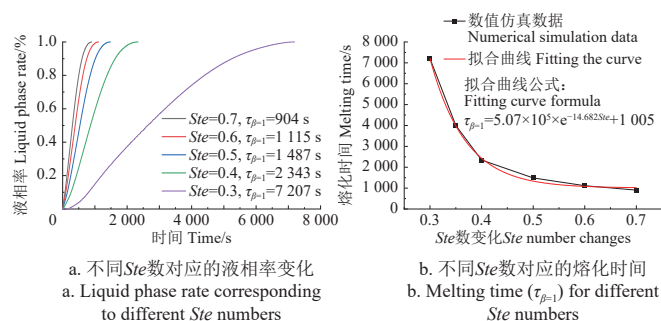


图 7 不同 Ste 数对应的熔化时间及液相率变化

Fig.7 Melting time and liquid phase rate changes corresponding to different Ste numbers

图 8a 为不同 Ste 数的热流量随时间的变化曲线, 由图中可以看出 Ste 数为 0.3 时, 在熔化初期热流量的峰值达到了 155 W, 之后逐渐降低, 出现这种现象的原因是初期与 PCM 存在温差的 HTF 进入内管进行换热, 由于

钢管的导热性能优越使得热流量迅速升高达到峰值, 随着换热过程的进行, HTF 继续向钢管传热, 并且在流动过程中出现热损失, 导致热流量逐渐降低, 直到熔化结束。当 Ste 数为 0.7 时, 其热流量的峰值达到了 436 W, 这是由于 HTF 入口温度与 PCM 的巨大温差所导致的, Ste 数 0.7 的熔化时间相比 Ste 数 0.3 缩短了 6 303 s, 原因在于当 Ste 数较大时, 导致 HTF 与 PCM 存在较大的温差, 可以更好的促进钢管和翅片的导热, 进而增大液态 PCM 的区域促使自然对流增加, 最终提高储热单元的熔化性能。

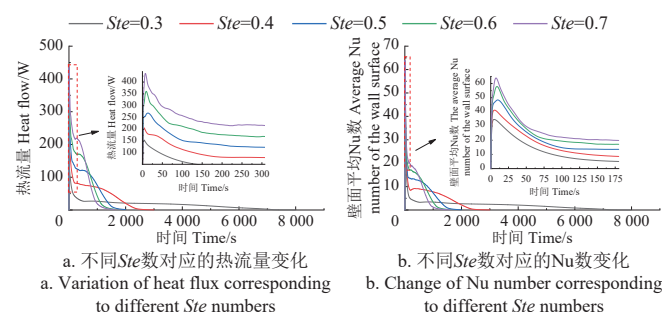


图 8 不同 Ste 数对应的热流量和 Nu 数变化

Fig.8 Heat flux and Nu number changes corresponding to different Ste numbers

由图 8b 可以看出, 随着熔化过程的进行, 提高 Ste 数其对应的壁面平均 Nu 数不断增大, 即在储热单元中液态 PCM 的自然对流强度也就越大, 表明提高 HTF 入口温度有助于促进对流换热, 进而提高储热系统的熔化速率。

图 9 为不同 Ste 数在 PCM 完全熔化时的储热量及平均储热功率的变化, 由图中可以看出, 随着 Ste 数的提高, PCM 储存的热量也会随之提高, 原因是当 Ste 数提高时, HTF 入口温度与储热单元 PCM 初始温度之间的温差进一步加大, 相变材料的储热方式是显热与潜热相结合, 5 种工况完全熔化时的潜热热量相等, 显热热量会随着 HTF 入口温度的增大而增加, 因此 Ste 数越大其储存的热量就越多。图中可以看出, 随着 Ste 数增大对应的平均储热功率也随之提高, 并且趋势符合线性一次函数。因此提升 Ste 数有利于改善储热系统的储热量和平均储热功率, 增大 HTF 与 PCM 的温差, 进而增强相变储热单元的换热效率, 使 PCM 完全熔化时间进一步缩短, 从而提升储热系统的换热性能。

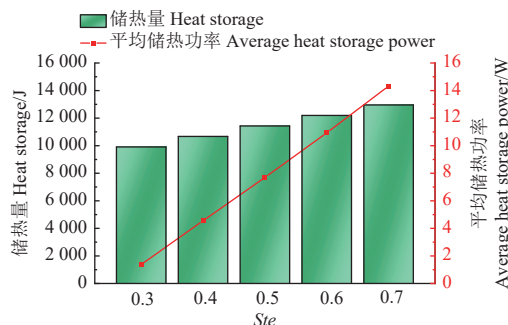


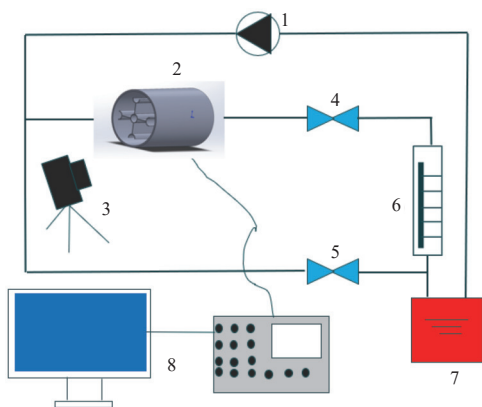
图 9 不同 Ste 数对应的储热量及平均储热功率

Fig.9 Heat storage and average heat storage power corresponding to different Ste numbers

3 套管相变储热单元的试验研究

3.1 试验系统

试验系统示意图如图 10 所示, 试验系统主要由循环水泵、恒温水槽、翅片管相变储热单元、数据采集系统和转子流量计等几个部分组成, 循环水泵将恒温水槽中的热流体输送到相变储热单元中的内管, 热水流经内管的过程中向管外的 PCM 传递热量, PCM 吸热之后开始熔化, 在此过程中可以通过热电偶来测量 PCM 的温度变化, 本套试验系统可以对套管式相变储热单元的储热过程展开研究。



1. 循环水泵; 2. 翅片管相变单元; 3. 相机; 4、5. 球阀;
6. 流量计; 7. 恒温水槽; 8. 数据采集系统
1. Circulating water pump; 2. Phase change unit; 3. Camera; 4、5. Ball valves;
6. Flowmeter; 7. Thermostatic sink; 8. Data acquisition systems

图 10 试验系统示意图

Fig.10 Schematic diagram of the test system

本试验采用了依柯斯有限公司的 YKS-6-105 型水泵, 功率为 55 W, 最大流量为 30 L/min, 峰值扬程为 6 m。

热水流量计采用转子流量计测量, 量程范围为 2~18 L/min。恒温水槽的工作范围为 0~100 °C, 温度场波动度为 ± 0.05 °C, 容量为 20 L, 加热功率为 1.3 kW。

数据采集仪的最大扫描频率为 200 Hz, 将数据采集仪与电脑相连, 可以通过软件设置时间间隔来实时监测 PCM 内部温度, 时间间隔为 5 s。

3.2 试验步骤

试验开始之前, 将添加 1.5%Cu 的复合相变材料放在恒温水浴中熔化备用, 等到相变单元中的翅片管和热电偶布置完成之后将熔化的液态 PCM 灌入储热单元中, 由于 PCM 在凝固过程中体积缩小, 在固体 PCM 和储热单元壁面之间产生空隙, 因此需要多次灌注。之后设定恒温水浴水温, 等待水温升高到所需要的水温, 打开循环水泵, 等到试验系统中残留的冷水排进后, 热电偶开始进行记录。

3.3 试验误差分析

在试验过程中误差不可避免, 这是由于试验仪器、试验环境、测量方法和人为因素的共同作用引起的。本试验中存在以下误差:

1) 人工读取温度计数值时, 观测值可能与真实值之间存在误差;

2) 试验中采用的 PCM 实际物性参数与厂家提供的物性参数存在误差;

3) 人工读取流量计数值时, 存在流量误差;

4) PCM 凝固之后体积缩小, 与壁面存在空腔现象;

5) PCM 与热水管壁存在接触热阻

数据采集仪在温度量程内的最大误差值为 0.32 °C, 本次试验的最小温度值为 27 °C, 相对误差最大值为 1.19%, 试验中的热电偶数据不确定度为 0.15%。

本试验采用的流量计的量程范围为 2~18 L/min, 精度为 $\pm 2\%$, 因此流量计的绝对误差为 0.36 L/min, 试验的最大水流量为 3 L/min, 其流量的最大相对误差为 12%, 因此试验系统温度和流量测量的误差最大值为 13.34%。

3.4 试验结果分析

如图 11 所示为不同 HTF 入口温度工况下试验与数值模拟的温度曲线变化图, 从图中可以看出 5 种温度工况下的数值模拟温度曲线变化规律大致相同, 在相变过程初期, HTF 入口温度对 PCM 温度变化的影响不大, 随着熔化过程的进行, 较高的 HTF 入口温度可以明显增强 HTF 到 PCM 的热流量, 导致相变储热的速度有进一步的提升, 此时可以看出 PCM 达到相变温度所需时间随着 HTF 入口温度的升高逐渐减小, 因此提高 HTF 入口温度有助于提升相变储热速率, 进而促进储热单元的相变储热过程。这是由于相变材料的储热方式是显热与潜热相结合, 不同温度工况下 PCM 完全熔化时的潜热热量相同, 显热热量会随着 HTF 入口温度的增大而增加, 因此提高 HTF 入口温度可以促进储热单元储热量的提升。从图中可以看出在相同 HTF 入口温度下数值模拟和试验的温度曲线存在一定偏差, 造成这种现象的原因是试验中环境温度的波动以及水泵流量和测温的不确定性。数值模拟温度与试验温度的最大误差为 10 K, 证明了数值模拟的准确性。

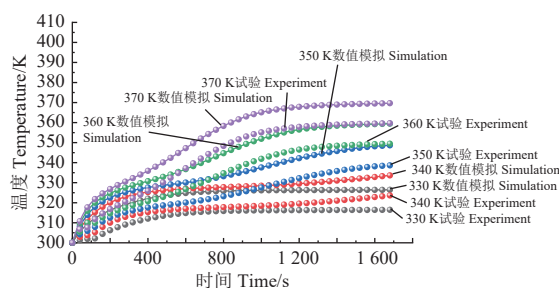


图 11 不同 HTF 入口温度工况下试验与数值模拟的温度曲线变化图

Fig.11 Variation of temperature curves under different HTF inlet temperature conditions and numerical simulations

4 结 论

本文以套管式储热单元为研究对象, 首先将纳米金属颗粒添加至混合有机相变材料, 制备了高导热的有机复合相变材料; 其次基于凝固-熔化模型, 计算了储热单元内相变材料的熔化过程, 优化了储热单元的翅片结构; 研究了不同传热流体入口温度对相变材料熔化过程的影

响,最后进行了储热单元的平台实验。所得主要结论如下:

1) 添加 1.5%Cu 纳米颗粒的复合相变材料导热系数最高,为 0.374 W/(m·K),与不添加纳米 Cu 的样品相比,导热系数提高了 14.37%。

2) 研究了 4 种基础形状翅片二维和三维的熔化数值模拟,确定了弧形翅片与传统的直翅片组合的翅片结构。

3) 随着 Ste 数的增加,相变材料总熔化时间按负指数幂的规律减小。

4) 当 Ste 数为 0.7 时,其热流量的峰值达到了 436 W,熔化时间相比 Ste 数 0.3 缩短了 6 303 s。

5) 实验系统温度和流量测量的误差最大值为 13.34%,数值模拟温度与实验温度的最大误差为 10 K。

[参 考 文 献]

- [1] 吴学红,王立勋,李伟平等.三套管式相变蓄热器强化传热研究[J].热科学与技术,2015,14(2): 101-105.
WU Xuehong, WANG Lixun, LI Weiping, et al. Research on enhanced heat transfer of three sets of tubular phase change heat accumulators[J]. Thermal Science and Technology, 2015, 14(2): 101-105. (in Chinese with English abstract)
- [2] 马蔷薇,李明,王利春,等.装配式柔性墙体日光温室联合储热系统蓄放热特性[J].农业工程学报,2024,40(15): 183-193.
MA Qiangwei, LI Ming, WANG Lichun, et al. Heat storage and release characteristics of prefabricated flexible wall solar greenhouse combined heat storage system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(15): 183-193. (in Chinese with English abstract)
- [3] 侯俊英,侯传源,李建昌,等.石蜡/ZIF-8@ZIF-67 定形相变材料的储热性能[J].农业工程学报,2023,39(13): 222-229.
HOU Junying, HOU Chuanyuan, LI Jianchang, et al. Heat storage performance of paraffin/ZIF-8@ZIF-67 shaped phase change materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(13): 222-229. (in Chinese with English abstract)
- [4] 崔海亭,杨锋.蓄热技术及其应用[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [5] 孙向昕,张华,王子龙,等.填充金属泡沫铜对相变材料在半圆柱容腔中传热机理的研究[J].西安交通大学学报,2023,57(2): 21-30.
SUN Xiangxin, ZHANG Hua, WANG Zilong, et al. Study on the heat transfer mechanism of phase change materials in semi-cylindrical cavities by filled metal copper foam[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(2): 21-30. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张晨宇,王宁,徐洪涛,等.纳米颗粒强化传热的多级潜热储热器性能评价[J].化工进展,2023,42(5): 2332-2342.
ZHANG Chenyu, WANG Ning, XU Hongtao, et al. Performance evaluation of multistage latent heat storage with nanoparticle-enhanced heat transfer[J]. Chemical Progress, 2023, 42(5): 2332-2342. (in Chinese with English abstract)
- [7] 段志军.无机有机定形相变材料导热增强与热化学性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2013.
DUAN Zhijun. Thermal Conductivity Enhancement and Thermochemical Properties of Inorganic Organic Shaped Phase Change Materials[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [8] 鲁博辉,师志成,张永学,等.石蜡/ Fe_3O_4 纳米颗粒复合相变材料在管壳式储热单元中的储/放热性能研究[J].储能科学与技术,2021,10(5): 1709-1719.
LU Bohui, SHI Zhicheng, ZHANG Yongxue, et al. Study on the heat storage/release performance of paraffin/ Fe_3O_4 nanoparticle composite phase change materials in shell-and-tube heat storage units[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1709-1719. (in Chinese with English abstract)
- [9] 方丽莉,柯惠珍,翟敏,等.负载纳米银颗粒增强 CA-MA/PAN 复合相变纤维膜的传热性能[J].材料科学与工程学报,2020,38(2): 325-329.
FANG Lili, KE Huizhen, ZHAI Min, et al. Loaded with silver nanoparticles enhances the heat transfer performance of rubber-morph/disc composite phase change fiber membranes[J]. Chinese Journal of Materials Science and Engineering, 2020, 38(2): 325-329. (in Chinese with English abstract)
- [10] 熊峰.原位合成纳米 ZnO 改性太阳盐储热材料制备工艺及性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2020.
XIONG Feng. Study on the Preparation Process and Properties of In-situ Synthesis of Nano-ZnO Modified Solar Salt Heat Storage Materials[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [11] 熊亚选,王振宇,徐鹏,等.添加纳米 MgO 和 SiO_2 颗粒对二元碳酸盐(Li_2CO_3 - K_2CO_3)比热容的影响[J].化工学报,2018,69(12): 4959-4965.
XIONG Yaxuan, WANG Zhenyu, XU Peng, et al. Effect of addition of nano- MgO and SiO_2 particles on the specific heat capacity of binary carbonate (Li_2CO_3 - K_2CO_3) [J]. CIESC Journal, 2018, 69(12): 4959-4965. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王艳.纳米粒子强化石蜡相变储热性能的实验研究[D].青岛:青岛科技大学,2013.
WANG Yan. Experimental Study on the Enhanced Heat Storage Performance of Paraffin Phase Change by Nanoparticles[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [13] 何林韩,凌凯莉,任瑞清,等.以 Cu 颗粒强化导热的木质基复合相变储热材料性能研究[J].北京林业大学学报,2022,44(12): 132-141.
HE Linhan, LING Kaili, REN Ruiqing, et al. Study on the properties of wood-based composite phase change heat storage materials strengthened by Cu particles for heat conduction[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(12): 132-141.

- (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘庆伟. 纳米二氧化钛强化的相变储能材料制备及其传热强化机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
LIU Qingyi. Preparation of Nano-titanium Dioxide-enhanced Phase Change Energy Storage Materials and Their Heat Transfer Enhancement Mechanism[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [15] 栾敬德, 陶佳璐, 烟征, 等. 表面活性剂对石蜡@SiO₂ 复合相变储热材料形貌和热性能的影响[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 68-72.
NUAN Jingde, TAO Jialu, YAN Zheng, et al. Effect of surfactants on the morphology and thermal properties of paraffin@SiO₂ composite phase change heat storage materials[J]. Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition), 2021, 42(3): 68-72. (in Chinese with English abstract)
- [16] 田东东, 王会, 刁永发, 等. 金属泡沫孔密度对石蜡融化性能影响的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(5): 32-39.
TIAN Dongdong, WANG Hui, DIAO Yongfa, et al. Experimental study on the effect of metal foam pore density on the melting properties of paraffin[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(5): 32-39. (in Chinese with English abstract)
- [17] 作凡, 王子龙, 张华, 等. 球状相变蓄热材料在水箱中的分层特性数值分析与实验[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22): 7702-7712.
WU Fan, WANG Zilong, ZHANG Hua, et al. Numerical analysis and experiment of delamination characteristics of spherical phase change heat storage materials in water tanks[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7702-7712. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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.
HUA Weisan, ZHANG Xuelai, LUO Xiaoxue, et al. Experimental study of nanometal/paraffin composite phase change heat storage materials[J]. Acta Solaria Sinica, 2017, 38(6): 1723-1728. (in Chinese with English abstract)
- [19] KARTHIKEYAN K, MARIAPPAN V, KALIDOSS P, et al. Preparation and thermal characterization of capric-myristic acid binary eutectic mixture with silver-antimony tin oxide and silver-graphene nanoplatelets hybrid-nanoparticles as phase change material for building applications[J]. Materials Letters, 2022, 328, 133086.
- [20] 周艳, 张金辉, 王艳, 等. 纳米金属粒子强化正十八烷相变传热性能的实验研究[J]. 材料导报, 2013, 27(12): 8-11.
ZHOU Yan, ZHANG Jinhui, WANG Yan, et al. Experimental study on the enhanced heat transfer performance of n-octadecane phase change by nano-metal particles[J]. Material Reports, 2013, 27(12): 8-11. (in Chinese with English abstract)
- [21] 许泽, 邢玉明, 殷健宝, 等. 分形翅片相变传热特性及优化[J]. 航空动力学报, 2024, 1-11.
XU Ze, XING Yuming, YIN Jianbao, et al. Fractal fin phase change heat transfer characteristics and optimization[J]. Journal of Aerodynamics, 2024, 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [22] 陈晓宇. 相变储热单元翅片结构优化及传热特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
CHEN Xiaoyu. Optimization of Fin Structure and Heat Transfer Characteristics of Phase Change Heat Storage Unit[D]. Jinan: Shandong University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [23] 于德涛. 相变储热系统中翅片结构的设计与优化[D]. 济南: 山东大学, 2023.
YU Detao. Design and Optimization of Fin Structure in Phase Change Heat Storage System[D]. Jinan: Shandong University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘斐. 三重管相变储热单元传热特性研究及结构优化[D]. 济南: 山东大学, 2023.
LIU Fei. Research on Heat Transfer Characteristics and Structural Optimization of Triple Tube Phase Change Heat Storage Unit[D]. Jinan: Shandong University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [25] 毛前军, 朱元媛. 新型分叉翅片强化管壳式储能罐储热性能[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(1): 69-78.
MAO Qianjun, ZHU Yuanyuan. The new bifurcated fins enhance the heat storage performance of the shell-and-tube energy storage tank[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(1): 69-78 (in Chinese with English abstract)
- [26] 李芑, 陈礼伟. 肋片强化管壳式相变蓄热器传热的模拟分析[J]. 洁净与空调技术, 2017(3): 5-11.
LI Fan, CHEN Liwei. Simulation analysis of heat transfer in a rib-strengthened shell-and-tube phase change heat accumulator[J]. Clean & Air Conditioning Technology, 2017(3): 5-11. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘立君, 宁雅倩, 李晓庆, 等. 偏心分形翅片管相变储热单元性能强化模拟[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(11): 3681-3687.
LIU Lijun, NING Yaqian, LI Xiaoqing, et al. Performance enhancement simulation of eccentric fractal finned tube phase change heat storage unit[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(11): 3681-3687. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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 Yongxue, WANG Zixi, LU Bohui, et al. Snowflake-shaped fins improve the heat storage/release performance of the phase change heat storage unit[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 521-530. (in Chinese with English abstract)
- [29] 林道光, 毛永宁, 李小花. 内翅式套管相变蓄热器蓄热特性的模拟研究[J]. 流体机械, 2021, 49(2): 84-89.

- LIN Daoguang, MAO Yongning, LI Xiaohua. Simulation study of heat storage characteristics of inner fin casing phase change heat accumulator[J]. *Fluid Machinery*, 2021, 49(2): 84-89. (in Chinese with English abstract)
- [30] AHMET S, KAMIL K. Thermal performance of a eutectic mixture of lauric and stearic acids as PCM encapsulated in the annulus of two concentric pipes[J]. *Solar Energy*, 2002, 72(6): 493-504.
- [31] AHMET S, HAYATI S, ADEM Ö. Thermal properties and thermal reliability of eutectic mixtures of some fatty acids as latent heat storage materials[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(3): 365-376.
- [32] QIAO Y, GAO Z, GU X, et al. Preparation and characterization of polyurethane/lauric acid-stearic acid as form-stable phase change materials with a wide phase transition temperature range[J]. *Materials Letters*, 2024, 361, 136120.

Thermal conductivity of composite phase change materials to optimize fin structure of casing heat storage unit

BAO Wei , WANG Shengjie^{*} , PU Wanxing , SONG Zihao

(Faculty of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010000, China)

Abstract: This study aims to optimize the phase change material (PCM) and fin structure, in order to improve the heat storage efficiency of the casing unit. Paraffin, lauric acid, and stearic acid were mixed with three organic PCMs. Once the total volume was constant, the volume fraction of the three PCMs was adjusted to prepare the mixed organic PCMs. An optimal combination was selected with the highest thermal conductivity. Then, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Fe, and Cu nanoparticles with different mass fractions were doped into the organic PCMs, in order to prepare a variety of composite phase change heat storage materials. The results show that four types of nano-Cu with different weight fractions (0.5%, 1%, 1.5%, and 2%) were selected as the additives to improve the thermal conductivity of the original PCM samples of 0.2% SDBS. The thermal conductivity values were 0.371, 0.373, 0.374, and 0.370 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, respectively, which were 13.46%, 14.07%, 14.37%, and 13.15% higher than that of the sample without Cu nanoparticles, respectively. The composite PCM with 1.5% Cu nanoparticles shared the highest thermal conductivity of 0.374 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, which was 14.37% higher than that of the sample without Cu nanoparticles. The typical fin structure of casing was summarized into four shapes: triangular, parallelogram, rectangular, and fan-shaped. The heat transfer performance of the four shapes was numerically simulated, according to the same working conditions: the volume ratio of the fin to the heat storage material, and the heat exchange edge length. It was found that the arc-shaped and straight fin were combined to achieve the high melting rate of the fan-shaped structure. The three-dimensional numerical simulation was carried out on the heat storage device of the fin structure using FLUENT software. Once the Ste number changed from 0.3 to 0.7, the melting time was reduced from 7 207 to 904 s, where the whole melting time was shortened by 6 303 s. Once the Ste number was 0.7, there was the maximum temperature difference between HTF and PCM. The natural convection was particularly intense to further accelerate the melting process of the heat storage unit. The relationship between melting time and Ste number was fitted by dimensionless quantity. The heat flux corresponded to the different Ste numbers. Once the Ste number was 0.3, the peak value of heat flux reached 155 W at the beginning of melting and then decreased gradually. The reason was that the HTF with the temperature difference between the initial and PCM entered the inner tube for heat exchange, and then the heat flux rate increased rapidly to the peak, due to the superior thermal conductivity of the steel pipe, while the HTF was continued to transfer the heat into the steel pipe, finally the heat loss occurred in the flow process, resulting in the heat flow rate gradually decreasing until the end of melting. The peak heat flow reached 436 W at a Ste number of 0.7, due to the large temperature difference between the HTF inlet temperature and the PCM. The findings can also provide a strong reference to improve the heat storage efficiency of phase change heat storage units.

Keywords: structural optimization; numerical simulation; casing type heat storage unit; phase change heat storage