

# 翅片增强空气式相变储能装置蓄热性能 模拟研究

冯国会,马天娇,赫娜

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 为解决空气式相变储能装置中存在的蓄热时间过长等问题,探究该装置蓄热性能的优化措施。**方法** 利用 FLUENT 仿真软件对添加不同体积分数、厚度和高度翅片空气式相变储能装置的温度场进行数值模拟,并对模拟结果进行比较分析。**结果** 翅片体积分数为 15%,厚度为 8 mm,高度为 14 mm 时,空气式相变储能装置蓄热时间缩短最显著,可缩短 46.97%。**结论** 翅片的添加对相变储能单元的熔化具有促进作用,通过优化翅片体积分数、厚度和高度参数,可以提高空气式相变储能装置的蓄热性能。

**关键词** 相变材料;蓄热工况;传热性能提升;翅片;参数优化

中图分类号 TU833<sup>+</sup>1;TK02

文献标志码 A

**引用格式**:冯国会,马天娇,赫娜.翅片增强空气式相变储能装置蓄热性能模拟研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(3):478-485.(FENG Guohui,MA Tianjiao,HE Na. Simulation of enhancing heat storage performance of air-type phase change energy storage device with fins[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2024,40(3):478-485.)

## Simulation of Enhancing Heat Storage Performance of Air-type Phase Change Energy Storage Device with Fins

FENG Guohui,MA Tianjiao,HE Na

(School of Municipal and Environmental Engineering,Shenyang Jianzhu University,Shenyang,China,110168)

**Abstract**:In order to solve the problems of long heat storage time for air-type phase change energy storage devices,optimization measures for the heat storage performance of the devices were studied.The temperature field of air-type phase change energy storage devices with fins of different volume fractions,thicknesses and heights was simulated by fluid dynamics simulation software FLUENT.The results showed that when the volume fraction of the fins is 15%,the thickness of

收稿日期:2023-08-05

基金项目:国家重点研发计划课题(2022YFC3802404);辽宁省教育厅科研项目(LJKZ0577);沈阳市科技计划项目(21-108-9-03)

作者简介:冯国会(1964—),男,教授,博士研究生导师,主要从事相变储能、可再生能源综合利用、可持续绿色生态建筑技术等方面研究。

the fins is 8 mm, and the height of the fins is 14 mm, the shortened heat storage time of the air-type phase change energy storage device was most, which can be shortened by 46.97%. This showed that the addition of fins promotes the melting of phase change energy storage units. By optimizing fin volume fraction, thickness, and height parameters, the heat storage performance of air-type phase change energy storage devices can be improved.

**Key words:** phase change material; thermal storage conditions; heat transfer performance improvement; fin; parameter optimization

建筑行业的高能耗以及高排放引发了一系列环境和生态问题,建筑碳排放能否得到有效控制对中国乃至全球能源转型起到关键作用<sup>[1]</sup>。因此,探索有效的解决方案来满足如此巨大的建筑行业能源需求,对于实现“双碳”目标具有重要的价值<sup>[2]</sup>。可再生能源太阳能的利用是降低能耗、实现“双碳”目标的有效途径。太阳能具有间断性、不稳定的缺点,相变储能能够切实提高太阳能利用效率,缓解能量供求在时间、空间、强度上错配的问题。朱林等<sup>[3]</sup>利用太阳能耦合相变材料(Phase Change Material, PCM),使太阳能在供热中直接利用,促进建筑领域节能减排。郭鑫<sup>[4]</sup>采用相变储能技术设计新型太阳能热水系统,解决了传统太阳能热水系统中存在的晴朗天气热量过剩及阴雨天气热量不足的问题,减少能源浪费,达到了削峰填谷的目的。聂秀等<sup>[5]</sup>提出一种以癸酸作为相变材料的热风式相变储能模块,实现热量向室内释放。然而,相变储能的规模化应用仍面临着相变材料热导率低、相变过程中传热性能差等问题<sup>[6]</sup>。在PCM中添加翅片是增强PCM潜热蓄放热性能的主流方式之一<sup>[7]</sup>,其中平板翅片以传热效率高、结构轻巧及适应性强等优点被广泛使用<sup>[8]</sup>。在PCM中添加翅片能够提高能源储存和利用效率,对于实现碳达峰和碳中和的目标具有重要意义<sup>[9-10]</sup>。

翅片的体积分数等参数都会对相变储能装置蓄热产生影响<sup>[11-17]</sup>。太阳能集成新风系统利用太阳能对空气式相变储能装置内的相变材料进行蓄热<sup>[18]</sup>,根据室内通风需求灵活加热室外新风,对保障室内空气品质、降低

建筑能耗、实现“双碳”目标具有重要意义。此系统中的一个重要节点就是空气式相变储能装置,空气式相变储能装置内部采用双通道形式,蓄热和放热通道分开运行,以PCM作为蓄热介质,与空气进行热交换,通过潜热蓄热的方式来进行热量储存,相变储能单元内的PCM为石蜡。然而,相变储能装置仍存在熔化不完全、PCM导热率低导致蓄热时间过长的现象。

综上所述,笔者利用FLUENT软件进行数值模拟,通过求解质量守恒方程、能量守恒方程、动量守恒方程<sup>[19-20]</sup>,得到添加不同型式翅片空气式相变储能装置的蓄热工况温度场;探究翅片参数对空气式相变储能装置蓄热的影响,缩短空气式相变储能装置的蓄热时间,提升其蓄热性能,丰富翅片增强空气式相变储能装置性能的全方面研究,促进潜热储能技术进一步发展。

## 1 数值模拟模型

### 1.1 物理模型

在空气式相变储能装置的相变模块中添加铝翅片,以解决由于PCM导热率低导致蓄热时间长的现象,考虑平衡效率、经济性等因素,模型为S型双通道空气式相变储能装置,长×宽×高为1.32 m×0.607 m×0.68 m,其中风道宽度为60 mm,PCM封装单元厚度为28 mm,出入风口为直径60 mm的圆柱形,如图1所示。翅片采用平直矩形,探究翅片的体积分数、厚度 $d_f$ 和高度 $L_f$ 等参数对相变储能单元传热性能的影响(见图2)。PCM和铝翅片的热物理性能参数如表1所示。

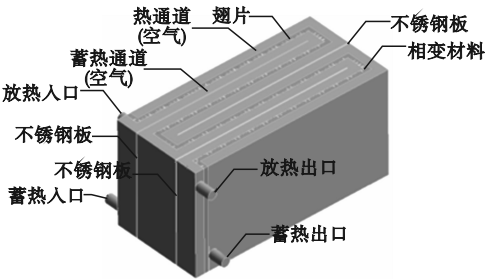


图1 S型双通道空气式相变储能装置物理模型

Fig. 1 Physical model of the dual S-channel air type phase change energy storage device

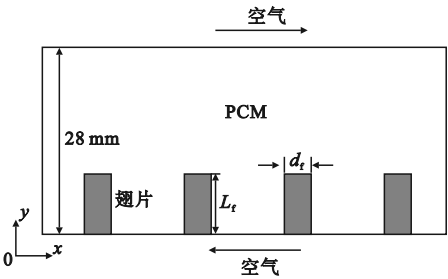


图2 添加翅片的相变储能单元示意图

Fig. 2 Schematic diagram of phase change energy storage unit with fins

表1 模型组成材料的热物理性能参数

Table 1 Thermal physical parameters of model materials

材料类型	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	热导率/( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	比热/( $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	相变区间/K	潜热/( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
PCM	720~920	0.355~0.558	2.8~3.2	287.56~292.79	141
铝制翅片	2 719	202.4	871	—	—

1.2 控制方程

空气式相变储能装置的蓄热过程为单向换热过程,在对其传热过程进行研究时,为了简化数值计算,做如下假设:

- (1)假设熔融 PCM 的运动为牛顿不可压缩层流;
- (2)利用 Boussinesq 近似模拟浮力诱导的自然对流;
- (3)PCM 的相变温度恒定;
- (4)PCM 封装单元的壁厚为 0,忽略其对传热效果的影响;
- (5)相变储能装置的外壳是绝热的,没有热量损失;
- (6)PCM 以及空气的比热容、导热系数、密度为常数(除在 Boussinesq 假设中温度变化引起的线性密度-温度关系外);
- (7)PCM 是均匀且各向同性的。

为研究 PCM 在熔化过程中的传热机制,建立能量守恒方程。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_f w)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

式中: $\rho_f$  为流体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $u$  为微元体速度矢量在  $x$  方向上的分量,  $\text{m}/\text{s}$ ;

$v$  为微元体速度矢量在  $y$  方向上的分量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $w$  为微元体速度矢量在  $z$  方向上的分量,  $\text{m}/\text{s}$ 。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho_f v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f v)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( u \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v. \quad (2)$$

式中: $\mu$  为 PCM 的运动黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $p$  为压强,  $\text{Pa}$ ;  $S_v$  为动量方程的源项。

能量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_f T_f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f \mu T_f)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f v T_f)}{\partial y} + \\ \frac{\partial(\rho_f w T_f)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{k}{c_f} \frac{\partial T_f}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{k}{c_f} \frac{\partial T_f}{\partial y} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{k}{c_f} \frac{\partial T_f}{\partial z} \right] + S_T. \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $T_f$  为流体温度,  $\text{K}$ ;  $k$  为导热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ;  $C_p$  气体的定压比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

1.3 边界条件与求解器设置

相变储能装置的外壳设置为绝热,将流体与相变储热单元的界面、翅片 PCM 的界面设置为耦合界面。在 PCM 与翅片界面处,假设温度和热流是连续的。对于熔融

PCM 的液体流动,采用无滑移假设。在模拟过程中忽略了相变储热单元包装容器的壁厚和热阻。相变储能装置的热风入口条件设置为管口初始速度,  $T_f = 323.15\text{ K}$ ,出口条件设置为自由出流,相变储能单元的初始温度  $T_0 = 280.15\text{ K}$ 。使用基于焓-孔隙率模型的凝固熔化模型模拟 PCM 的熔化过程。采用 SIMPLE 算法对压力和速度进行耦合,动量和能量的离散均采用二阶迎风格式。

1.4 网格和时间步长的选取

为提高模拟结果的准确性,进行了网格和时间步长的无关性检验。

选取 0.01 m、0.02 m、0.04 m 三种不同尺寸进行网格划分,网格数分别为 325.03 万、85.86 万、14.26 万。将网格导入 FLUENT 中进行数值计算,不同网格数的模型计算出的 PCM 平均温度如图 3 所示。当网格数量为 14.26 万时,PCM 平均温度的相对误差为 4.04%;当网格数量为 85.86 万时,PCM 平均温度的相对误差已经达到 0.075%,与网格数量为 325.03 万时相差很小,综合考虑时间和计算成本等综合因素,选择 0.02 m 网格尺寸来划分模型。

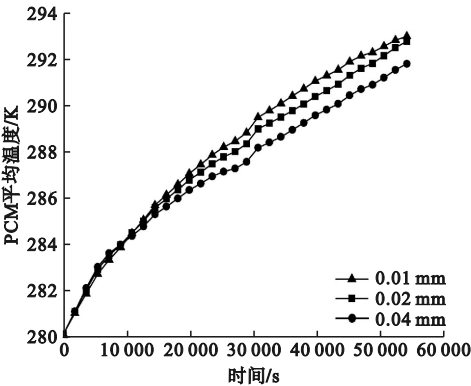


图3 网格尺寸无关性检验

Fig. 3 Grid size independence test

图 4 为时间步长无关性检验结果。从图 4 可以看出,在时间步长为 1 s 时,可近似认为温度达到稳定,若步长取得太小,会大大增加计算周期,若步长取得太大,又会影响计算精度,综合考虑,选取计算的时间步长为 1 s。

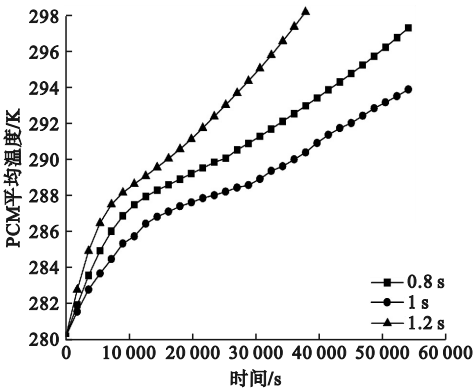


图4 时间步长无关性检验

Fig. 4 Time step independence test

1.5 数值模型验证

为验证模型的准确性,将当前的数值模型与文献[17]进行了比较。图 5 为两者结果对比,数值模拟的液相率随时间变化的曲线与试验数据变化趋势一致,PCM 液相率相对误差为 9.88%。表明模拟与文献中的试验结果吻合度良好,当前的模拟模型具有足够的精度。

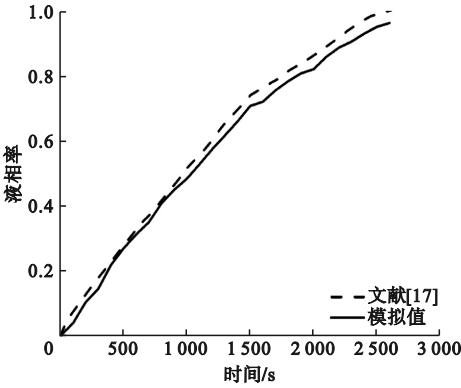


图5 模拟值和文献[17]的结果对比

Fig. 5 Comparison of simulations values and values in Ref. [17]

1.6 模拟工况设计

建立空气式相变储能装置相变单元熔化、凝固模型,分析并评估包括翅片的体积分数(总翅片体积占原 PCM 的体积分数)、厚度和高度等翅片参数对装置内 PCM 温度和熔化速率的影响。设置 10 种工况来分析翅片参数对 PCM 传热性能的影响(见表 2)。通过工况一、工况三、工况六、工况七和工况九之间的比较,研究翅片体积分数对空气式

相变储能装置的蓄热影响;通过工况一、工况二、工况三和工况六之间的比较,研究翅片厚度对空气式相变储能装置的蓄热影响;通过工况一、工况三、工况四、工况五、工况八、工况九和工况十之间的比较,研究翅片高度对空气式相变储能装置的蓄热影响。

表2 各工况参数设定

Table 2 Parameters settings for numerical simulation

组别	体积分数/%	翅片厚度/mm	翅片高度/mm
工况一	0	0	0
工况二	8	2	14
工况三	8	4	14
工况四	8	4	20
工况五	8	4	27
工况六	8	8	14
工况七	15	4	14
工况八	15	8	9
工况九	15	8	14
工况十	15	8	27

2 翅片的参数敏感性分析

2.1 翅片对相变储能单元的蓄热影响

图6为有无翅片PCM液相率对比云图。

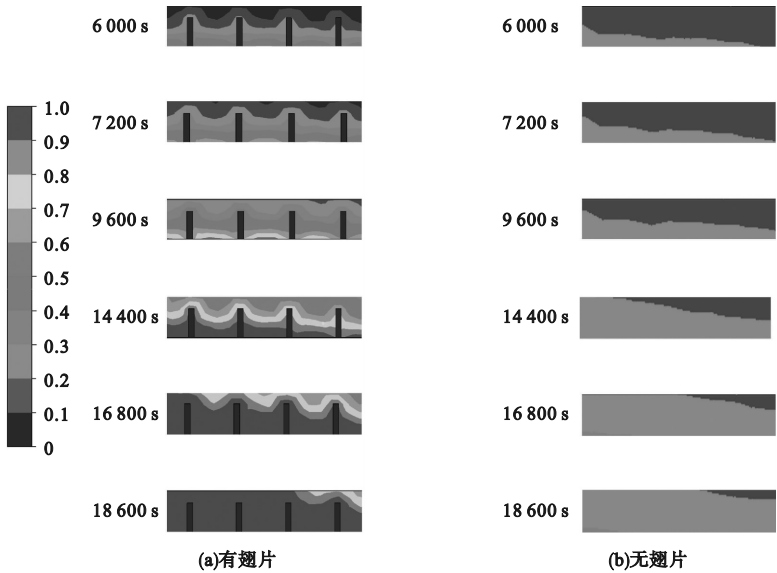


图6 翅片对PCM液相率影响对比图

Fig. 6 Comparison of PCM liquid fraction with and without fins

2.2 翅片体积分数的影响

图7为添加不同体积分数翅片的PCM温度变化结果。

图7(a)中,添加厚度为4 mm、高度为

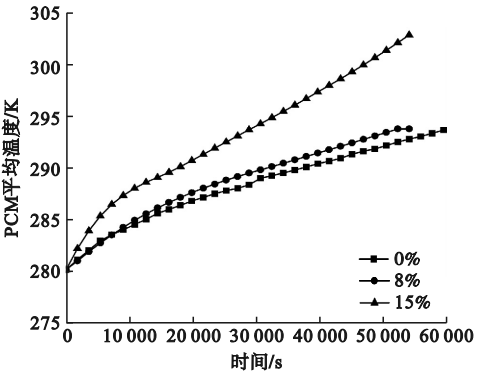
图6(a)为添加翅片的PCM在不同时刻液相率云图,图6(b)为未添加翅片相应时刻的PCM液相率云图。

从图6可以看出,添加翅片后,各个时刻PCM熔化更完全,即PCM的熔化速率均大于未添加翅片的PCM。由于热量沿着翅片方向以及垂直壁面传递速率较快,靠近翅片以及壁面的PCM温度较高;9 600 s时,靠近壁面的PCM最先开始熔化,这是因为壁面与PCM的接触面积较大,且壁面温度较高;14 400 s时,靠近翅片的熔融PCM呈现金字塔形,尖端为翅片长度的一半,这说明沿翅片有一个较大的温度梯度,翅片中部温度达到PCM的熔点;翅片温度逐渐升高,16 800 s时,熔融态PCM的金字塔尖到达翅片顶端,受自然对流的影响,尖端面积越来越大,几乎平行于翅片的顶端,各个翅片周围熔融态PCM的塔尖合并,形成波浪形状;18 600 s时,随着温度的升高,熔融态PCM增多,液态范围逐渐扩大,波谷被填平。

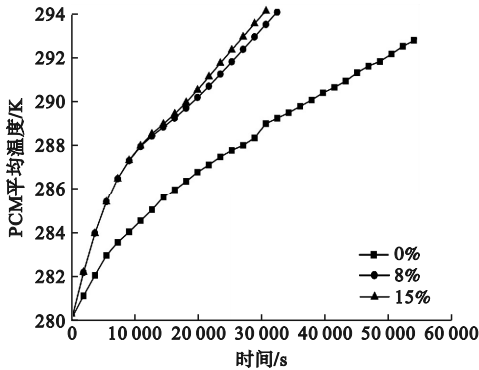
14 mm、体积分数为8%翅片的装置,蓄热时间缩短了6.08%;添加相同厚度、高度,体积分数为15%翅片的装置,蓄热时间缩短了47.84%,PCM的完全熔化时间随着翅片体



积分数的增加而大幅减少。翅片体积分数的增加,增强了 PCM 的传热性能。首先是因为随着翅片体积的增加,PCM 的体积减少,PCM 体积越小,导致 PCM 熔化所需的总热量也随之减少;其次相同厚度、高度翅片的体积分数增加时,不仅可以增大翅片与 PCM 传热面积,还使热量传递的更加深入;同时随着翅片体积分数的增加,翅片之间的间距减小,翅片之间的 PCM 温度上升速率更快,PCM 整体温度分布更加均匀。因此随着翅片体积分数的增加,PCM 温度提升速度快,熔化速度提升。



(a)添加翅片厚度为4 mm、高度为14 mm



(b)添加翅片厚度为8 mm、高度为14 mm

图7 添加不同体积分数翅片的 PCM 温度

Fig. 7 The temperature of the PCM with different volume fractions fins

从图 7(b) 看出,添加厚度 8 mm、高度 14 mm、体积分数 8% 翅片的装置,蓄热时间缩短了 43.42%;添加相同厚度、高度,体积分数为 15% 翅片的装置,蓄热时间缩短了 46.97%。翅片厚度为 8 mm 时,添加 8% 和 15% 体积分数的翅片,与未添加翅片相比蓄

热速率大幅提升。但两种体积分数翅片对热传导的增强程度相近,这是因为翅片厚度处于较大的数值,影响了 PCM 的流动。因此翅片厚度处于较大数值时,翅片体积分数的增加对 PCM 传热性能的增强不明显。

2.3 翅片厚度的影响

图 8 为添加不同厚度翅片 PCM 的平均温度与时间的关系。

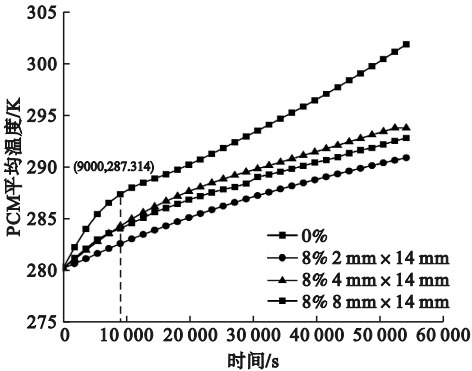


图8 添加不同厚度翅片的 PCM 温度

Fig. 8 The temperature of PCM with different thickness fins

可以看出,随着翅片厚度的增加,PCM 的熔化时间缩短,熔化速率有所提升,8 mm 厚度翅片与 4 mm 厚度翅片相比,蓄热时间缩短了 37.34%。从图 8 可以看出,添加厚度为 8 mm 翅片的 PCM,在约 9 000 s 前为固态,该阶段为以热传导为主的显热蓄热阶段;此后,PCM 开始熔化,进入以对流传热为主的潜热蓄热阶段,比较图 8 曲线的斜率可以发现,与未添加翅片的 PCM 相比,随着翅片厚度的增加,以对流传热为主的潜热蓄热阶段的蓄热速率也有所增加。因此翅片厚度的增加不仅促进了 PCM 热传导,同时自然对流也有所改善。厚度为 2 mm 的翅片由于过薄,反而对 PCM 的蓄热产生了抑制作用,使蓄热时间延长、蓄热速率降低。这是因为翅片与 PCM 的接触面积较小,根据傅里叶定律可知,导热量也相对较小,同时翅片阻碍了熔融 PCM 的流动,翅片所起的对流传热阻碍作用大于导热作用。由此可见,翅片厚度

的增加对 PCM 的蓄热具有促进作用;过薄的翅片不仅不能增强 PCM 的传热性能,反而会产生抑制作用。

2.4 翅片高度的影响

图 9 为翅片的高度对 PCM 传热性能的影响。添加体积分数为 8%,厚度为 4 mm,高度分别为 14 mm、20 mm 和 27 mm 的翅片,蓄热时间分别缩短了 6.08%、44.39% 和 5.28%。从图 9(a)看出,当翅片高度由 14 mm 增加到 20 mm 时,随着翅片高度的增加,PCM 蓄热时间缩短,不论是前期以热传导为主的传热阶段,还是后期以自然对流为主的传热阶段,蓄热速率都有所提升。这是因为翅片高度的增加,可以增大传热面积,还能使热量传递的更加深入。当翅片高度增加到 27 mm 时,翅片对 PCM 传热性能的提升程度反而减少。

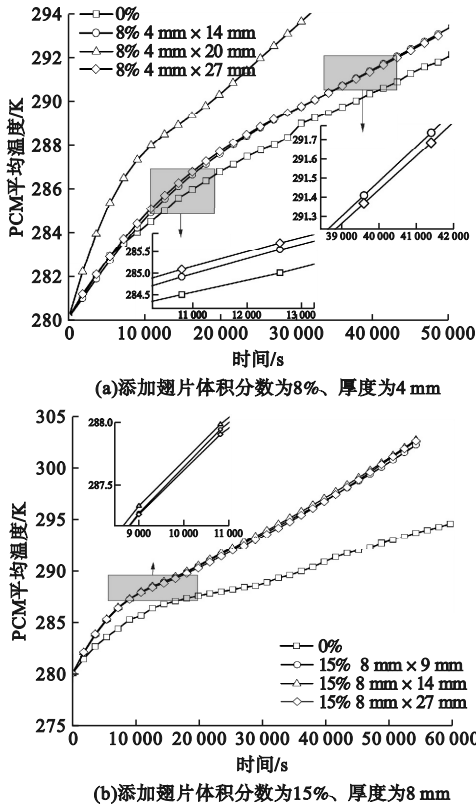


图 9 添加不同高度翅片的 PCM 温度  
Fig. 9 The temperature of PCM with different height fins

从图 9(b)看出,添加体积分数为 15%,

厚度为 8 mm,高度分别为 9 mm、14 mm 和 27 mm 翅片,蓄热时间分别缩短了 46.1%, 46.97% 和 44.78%。对比添加 9 mm 厚度翅片与 14 mm 高度翅片温度与时间变化曲线,PCM 的熔化时间、熔化速率变化不大。这是因为翅片体积分数及厚度处在较大的数值,当高度进一步增加时,翅片对 PCM 对流传热的扰动作用变大,导致翅片高度对 PCM 传热性能的增强效果不明显。当翅片高度由 14 mm 增加到 27 mm 时,PCM 的蓄热时间只增加了 2.19%,这是因为翅片体积分数和厚度处在较大数值,翅片高度增加会对熔融 PCM 的对流传热起到阻碍作用。

3 结 论

(1)平直翅片对于空气式相变储能装置的蓄热过程具有促进作用,可同时提高前期以热传导为主导阶段以及后期以自然对流为主导阶段的传热性能;添加翅片体积分数为 15%,厚度为 8 mm,高度为 14 mm 的装置,蓄热时间缩短最显著,可缩短 46.97%。

(2)翅片的体积分数、厚度、高度参数的增加都对 PCM 的传热性能产生正向影响,对传热影响最大的是翅片的体积分数;但翅片体积分数、厚度和高度参数达到某一数值后,传热性能的增强效果不显著,因此在优化翅片参数时,应对体积分数、厚度和高度进行综合考虑。

参考文献

[1] HUANG L, KRIGSVOLL G, JOHANSEN F, et al. Carbon emission of global construction sector [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2018, 81: 1906 – 1916.  
[2] 王建国. 中国建筑“双碳”路径的科学问题与研究建议[J]. 中国科学基金, 2023, 37(3): 353 – 359.  
(WANG Jianguo. The scientific questions and research recommendations of Chinese architecture's “carbon peaking and carbon neutrality” route [J]. Bulletin of national natural science foundation of China, 2023, 37(3): 353 – 359.)

- [3] 朱林,白文明,吕正煜,等. 太阳能耦合相变材料供暖的经济性分析[J]. 广西节能,2023(4):25-27.  
(ZHU Lin, BAI Wenming, LYU Zhengyu, et al. Economic analysis of solar-coupled PCM heating [J]. Guangxijieneng, 2023(4):25-27.)
- [4] 郭鑫. 基于相变储能的太阳能热水系统设计与研究[D]. 济南:山东农业大学,2023.  
(GUO Xin. Design and research of solar water heating system based on phase change energy storage [D]. Ji'nan: Shandong Agricultural University, 2023.)
- [5] 聂秀,崔文智. 热风式相变储能模块的蓄放热特性实验[J]. 重庆大学学报,2022,45(5):107-113.  
(NIE Xiu, CUI Wenzhi. Experimental study on the thermal performance of a hot air phase change thermal storage module [J]. Journal of Chongqing university, 2022, 45(5):107-113.)
- [6] 夏莉. 复合相变储能材料的研制与潜热储能中热物理现象的研究[D]. 上海:上海交通大学,2011.  
(XIA Li. Preparation of composite phase change material and study on the thermophysical phenomena in the latent thermal energy storage [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.)
- [7] PANCHABIKESAN K. Effect of fin orientations in a spherically encapsulated phase change materials for effective heat transfer enhancement [J]. Chemical engineering transactions, 2018, 62:277-282.
- [8] 刘景成,张树有,周智勇. 板翅换热器流道结构改进与流体流动性能分析[J]. 机械工程学报,2014,50(18):167-176.  
(LIU Jingcheng, ZHANG Shuyou, ZHOU Zhiyong. Analysis of channel structure improvement and its influence on fluid flow in plate-fin heat exchanger [J]. Journal of mechanical engineering, 2014, 50(18):167-176.)
- [9] COSTA M, BUDDHI D, OLIVA A. Numerical simulation of a latent heat thermal energy storage system with enhanced heat conduction [J]. Energy conversion and management, 1998, 39(3):319-330.
- [10] PENG B, QIU M, XU N, et al. Optimum orthogonally structured fins in charging enhancement of phase change materials (PCMs): PCMs' thermophysical properties effects [J]. International journal of thermal sciences, 2023, 184:108005.
- [11] DESAI A N, GUNJAL A, SINGH V K. Numerical investigations of fin efficacy for phase change material (PCM) based thermal control module [J]. International journal of heat and mass transfer, 2020, 147:118855.
- [12] KHODADADI M, SHEIKHOLESAMI M. Numerical simulation on the efficiency of PVT system integrated with PCM under the influence of using fins [J]. Solar energy materials and solar cells, 2021, 233:111402.
- [13] LIU Z, SUN X, MA C. Experimental investigations on the characteristics of melting processes of stearic acid in an annulus and its thermal conductivity enhancement by fins [J]. Energy conversion and management, 2005, 46(6):959-969.
- [14] SAHA S K, SRINIVASAN K, DUTTA P. Studies on optimum distribution of fins in heat sinks filled with phase change materials [J]. Journal of heat transfer-transactions of the asme, 2008, 130(3):034505.
- [15] YILDIZ Ç, ARICI M, NİZETİ Ç S, et al. Numerical investigation of natural convection behavior of molten PCM in an enclosure having rectangular and tree-like branching fins [J]. Energy, 2020, 207:118223.
- [16] ABDULATEEF A M, MAT S, ABDULATEEF J, et al. Geometric and design parameters of fins employed for enhancing thermal energy storage systems: a review [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2018, 82:1620-1635.
- [17] ZHAO C, WANG J, SUN Y, et al. Fin design optimization to enhance PCM melting rate inside a rectangular enclosure [J]. Applied energy, 2022, 321:119368.
- [18] HUANG K, ZHAO S, FENG G, et al. Thermal performance of dual S-channel air-type phase change energy storage device [J]. Applied thermal engineering, 2020, 171:115071.
- [19] CHEN C, ZHAO B. Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor [J]. Atmospheric environment, 2011, 45(2):275-288.
- [20] CHEN R, ZHOU B, KAN H, et al. Associations of particulate air pollution and daily mortality in 16 Chinese cities: An improved effect estimate after accounting for the indoor exposure to particles of outdoor origin [J]. Environmental pollution, 2013, 182:278-282.

(责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)