

文章编号: 1671-0576(2024)04-0026-07

相变储热装置强化换热数值仿真研究

高林星, 李 前, 焦美敬, 王炳琪, 张 静

(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

摘 要: 针对相变材料导热性能差的问题, 采用 ANSYS FLUENT 软件对内置矩形肋片强化换热的石蜡类相变储热板进行了数值仿真。在储热板外形尺寸和热流密度一定的条件下, 通过改变矩形肋片的数量、高度和厚度, 得到了不同肋片参数下储热板的表面温度分布、温差分布及石蜡液相率分布。数值仿真结果表明: 矩形肋片在强化相变材料换热的过程中起到了重要的作用, 其参数会影响换热效果; 在储热板尺寸一定时, 增加肋片的数量、厚度和高度均能降低储热板表面温度、温差和石蜡液相率, 但存在最佳值。研究结果可为相变材料储热装置的结构优化设计提供依据。

关键词: 相变材料; 数值仿真; 强化换热; 矩形肋片

中图分类号: TK02

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2024.04.005

Numerical Simulation Study on Enhanced Heat Transfer of Phase Change Material Heat Sink

GAO Linxing, LI Qian, JIAO Meijing, WANG Bingqi, ZHANG Jing

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Aiming at the problem of low thermal conductivity of phase change material (PCM), a numerical simulation was carried out by using ANSYS FLUENT software, in which the thermal performance characteristics of paraffin-type PCM-based heat sink enhanced by plate fins were studied. The effects of different geometrical parameters including number, thickness and height of plate fins were analyzed under the same external dimensions and the same heat flux of the PCM-based heat sink. Different aspects such as the base temperature, the temperature difference as well as the melting rate of paraffin were considered. Numerical simulation results show that plate fins play a crucial role in the process of the enhancement of heat transfer of PCM, in which geometrical parameters of plate fins can affect thermal performance characteristics. The increasing of plate fin number, fin thickness and fin height can lead to a signification decrease in the base temperature, the temperature difference as well as the melting rate of paraffin under the same external dimensions of the PCM-based heat sink. However, there is optimal value for each

geometrical parameter. The achievement provides a reference for the geometrical parameters optimization design of PCM-based heat sink.

Key words: phase change material; numerical simulation; enhanced heat transfer; plate fin

0 引言

近年来,随着芯片热功耗的增加,对电子设备热管理的要求越来越高。相变材料(phase change material, PCM)具有密度小、热性能稳定、安全性高等优点,因此被广泛应用到太阳能系统、建筑制冷和温控系统以及卫星的热管理系统中^[1]。但相变材料的导热系数较低,这是制约其换热性能的主要因素。目前常见的强化换热^[2]手段主要有三种:a)在相变材料中掺杂石墨、铜粉和铝粉;b)在封装壳体内设置金属肋片作为导热增强筋;c)采用泡沫铜、泡沫铝、膨胀石墨基体吸附相变材料等。

目前国内的研究工作大部分都集中在复合相变材料的试验上,对内置肋片的强化换热研究较少。国外研究机构早在21世纪初就已经开展了内置肋片强化换热的相关数值仿真和试验研究。ALAWADHI等^[3]采用二维模型仿真分析了肋片数量对换热性能的影响;NAYAK等^[4]采用数值仿真方法研究了肋片数量对换热性能的影响;SAHA等^[5]通过试验和仿真确定了适用于一种热沉的肋片最优分布方式;HOSSEINIZADEH等^[6]对内部有无肋片的储热装置进行了试验和数值仿真研究,试验结果与仿真结果基本保持一致;PAKROUH等^[7]对采用针式肋片的相变储热装置进行了参数化研究。郭茶秀等^[8]建立了二维传热模型,采用数值方法研究了肋片长宽比对石蜡相变换热性能的影响。

本文针对一种在高温环境下使用的石蜡相变储热装置,建立其三维模型;在储热板尺寸一定和热流密度相同的条件下,采用ANSYS FLUENT软件对矩形导热肋片的数量、厚度和高度对石蜡换热性能的影响进行数值模拟,为内置矩形导热肋片的相变储热板结构优化设计提供参考。

1 物理模型

本文建立了相变储热板的三维模型,其外形结构及内部肋片分布如图1所示。

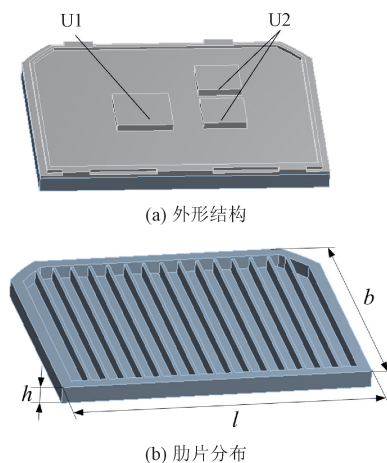


图1 相变储热板外形结构及内部肋片分布

相变储热板模型的长(l) \times 宽(b) \times 高(h)为160 mm \times 112 mm \times 11 mm。储热板上表面有三个用于芯片散热的凸台,凸台高度均为3 mm,凸台U1和U2上恒有功率为16.75,10.00 W的均匀热流,其他壁面绝热。相变储热板的外形结构如图1(a)所示。相变材料石蜡封装在相变储热板的铝合金腔体内部,腔体内设置了矩形铝合金导热肋片,肋片分布示意图如图1(b)所示。

通过改变肋片的数量、厚度和高度得到不同的肋片分布,分析肋片参数变化对石蜡相变换热性能的影响。相变材料石蜡和铝合金导热肋片的热物性参数如表1所示。

2 数值求解原理

相变传热是一个复杂的固-液两相转化过程,期间伴随着吸收和释放潜热,在数学上属于高

表 1 石蜡和肋片热物性参数

热物性参数	石蜡	肋片
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	760	2 770
比热容 $C_p / (\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	2 600	875
导热系数 $k / (\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	0.2	173
相变潜热 $L / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	17 000	—
相变温度 $T_L / ^\circ\text{C}$	65~75	—
动力粘度 $\mu / (\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1})$	0.003 65	—

度非线性的传热问题。因相变过程中固-液相变界面位置是不断移动的,确定两相界面是求解的难点。目前常用的求解方法是焓法和等效热容法^[9],本文采用基于数值方法的焓法进行界面求

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + S_x \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + S_y \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w + S_z \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} S_x = \frac{(1-\beta)^2}{\beta^2 + \omega} A_m u \\ S_y = \frac{(1-\beta)^2}{\beta^2 + \omega} A_m v - \rho g \alpha (T - T_0) \\ S_z = \frac{(1-\beta)^2}{\beta^2 + \omega} A_m w \end{cases} \quad (3)$$

式中: p 为压力; ∇ 为哈密顿算子; S_x, S_y, S_z 分别为 x, y, z 方向上的动量源项; β 为液相率; ω 和 A_m 为常数; g 为重力加速度; α 为热膨胀系数; T 为温度, T_0 为参考温度。

能量方程的表达式为

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla(\rho v H) = \nabla(k \nabla T) + S_h \quad (4)$$

其中

$$H = h + \Delta H \quad (5)$$

$$h = h_0 + \int_{T_0}^T C_p dT \quad (6)$$

$$\Delta H = \beta L \quad (7)$$

$$\beta = \begin{cases} 0, & T \leq T_s \\ \frac{T - T_s}{T_1 - T_s}, & T_s < T < T_1 \\ 1, & T \geq T_1 \end{cases} \quad (8)$$

$$S_h = \rho \partial(\Delta H) / \partial t \quad (9)$$

解。焓法是将热焓和温度一起作为待求函数,在整个区域内建立统一的能量方程,利用数值方法求解焓分布,然后确定两相界面。

焓法不需要跟踪相变界面,不必分区建立控制方程,其控制方程可以用连续性方程、动量方程及能量方程进行表示。

连续性方程的表达式为

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

式中: t 为时间; u, v, w 分别为 x, y, z 方向上的速度。

动量方程的表达式为

式中: H 为总焓; \mathbf{v} 为速度矢量; S_h 为能量源项; h 为显热焓; h_0 为在参考温度 T_0 下的参考焓; ΔH 为潜热焓; T_s 为固相温度; T_1 为液相温度。

采用 ICEM 软件划分结构网格,并在近壁面对网格进行加密,经网格独立性验证,最终确定的网格数为 20 万。采用 ANSYS FLUENT 软件中的 Solidification/Melting 模型,基于压力求解器求解控制方程,采用 Simple 算法进行计算,考虑重力影响,动量和能量差分方式均采用二阶迎风。为保证求解精度,设时间步长为 0.1 s,最大迭代步数为 20。在每个时间步长内对各控制方程进行迭代计算,直至结果收敛或达到最大迭代步数,仿真时间为 60 min。

3 数值仿真方法验证

为验证所采用的数值仿真方法的准确性,本文对某内置导热肋片的相变储热板分别进行了仿真计算和试验验证。

储热板外形尺寸和内部肋片分布形式与图 1 相同,其中肋片数量为 6,肋片厚度为 2 mm,肋片高度为 11 mm。在凸台 U1 和 U2 的表面贴加热片,分别施加功率为 16.75 W 和 10.00 W 的恒定热流。将储热板放置在 60 °C 的温箱中进行试验,

试验时间为 60 min。试验过程中将储热板外表面罩住,以减少温箱鼓风与储热板表面的对流换热,凸台表面贴热电偶进行温度采集。同时,保持相同的边界条件,对储热板的物理模型进行仿真计算,并与试验结果进行对比。凸台 U2 表面温度分布的仿真和试验结果对比如图 2 所示。

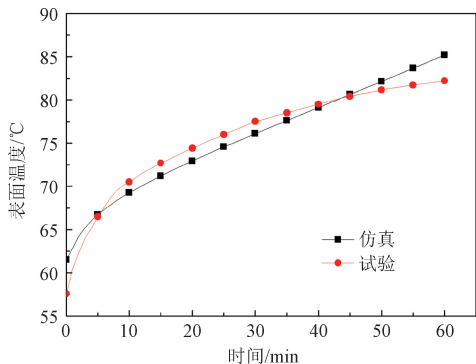


图 2 凸台 U2 表面温度分布的仿真与试验结果对比

从图 2 可以看出,数值仿真结果与试验结果基本一致,二者误差在合理范围内。这说明本文采用的数值仿真方法可以较好地模拟相变材料的换热过程。

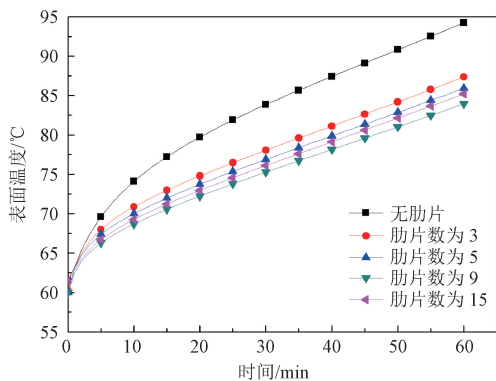
4 数值仿真结果分析

4.1 肋片数量对换热的影响

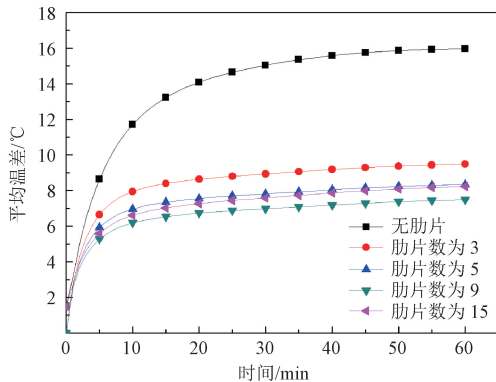
在储热板尺寸一定时,分别对肋片厚度和高度相同、肋片数量不同的储热板的换热性能进行数值仿真。设肋片厚度为 1.5 mm,肋片高度为 7.0 mm,肋片数量分别为 0,3,5,9,15。不同肋片数量对换热的影响曲线如图 3 所示。

数值仿真结果表明:当肋片数量分别为 0,3,5,9 时,随着肋片数量的增加,凸台 U2 的表面温度降低,凸台与储热板表面的温差同步减小,储热板表面温度分布更均匀;但当肋片数量增加到 15 时,凸台 U2 的表面温度反而升高,平均温差也随之加大,这说明在储热板尺寸和热耗一定的前提下,存在一个最佳肋片数量;改变肋片数量对石蜡的液相率影响不大,随着肋片数量增加,液相率略微降低;当肋片数量增加到 15 时,液相率又升高。

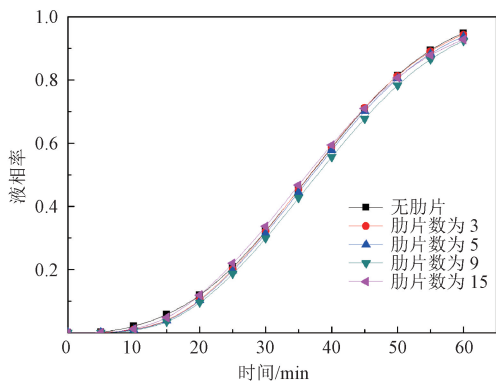
从图 3(a)和图 3(b)可以看出,随着肋片数量的增加,凸台的表面温度降低,温差同步减小。在本文研究中,分布在三个导热凸台上的热量传导



(a) 凸台 U2 表面温度分布



(b) 凸台 U2 与储热板表面平均温差分布



(c) 石蜡液相率分布

图 3 不同肋片数量对换热的影响曲线图

至储热板壳体和导热肋片上,导热肋片与石蜡接触,将热量传导给石蜡。热源下方的石蜡因为温度升高先开始熔化,由于肋片之间不互连,离热源位置较远的石蜡区域熔化较晚。随着肋片数量增加,肋片在横向起到扩散热量的作用,热传导路径得到改善。热量在热源下方的聚集效应减弱,基板温度降低,储热板表面温度分布更均匀。但由于肋片将石蜡分隔在不同的区域内,抑制了不同区域间石蜡的对流。随着肋片数量增加,区域内的石蜡体积减小,总的潜热减少,因此当肋片数量

增加到 15 时,凸台表面温度又开始升高,温差增大。这说明热传导在储热板前期的传热过程中起主要作用,当温度达到石蜡的熔点,即石蜡进入液相状态后,石蜡的对流在传热过程中将起主要作用。

从图 3(c)可以看出,改变肋片数量,石蜡的液相率变化不大,但当肋片数量增加到 15 时,液相率升高。这主要是由于所选的肋片厚度较小,当肋片数量为 0,3,5,9 时,石蜡体积变化不是很大。但当肋片数量增加到 15 时,区域内的石蜡体积明显减小,潜热减少,每个单独区域内的石蜡都进入了液相状态,总的液相率增大,储热作用降低,基板温度也随之升高。

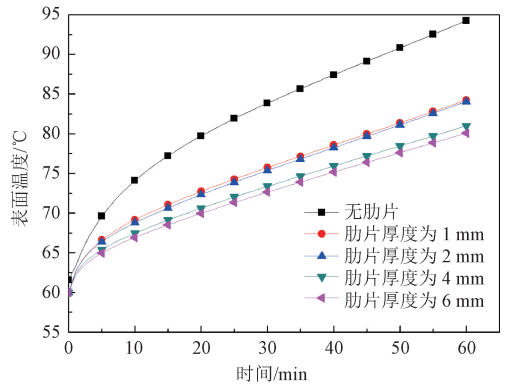
4.2 肋片厚度对换热的影响

在储热板尺寸一定时,分别对肋片数量和高度相同、肋片厚度不同的储热板的换热性能进行数值仿真。设肋片数量为 9,肋片高度为 7 mm,肋片厚度分别为 1,2,4,6 mm。不同肋片厚度对换热的影响曲线如图 4 所示。

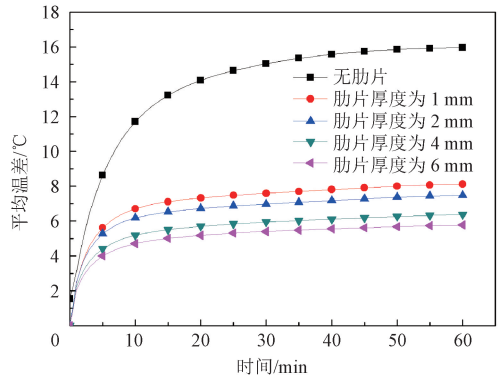
数值仿真结果表明:随着肋片厚度的增加,凸台 U2 的表面温度降低,凸台与储热板表面温差变小,储热板表面温度分布更均匀;当肋片厚度从 2 mm 增加到 4 mm 时,温度降低作用比较明显;当肋片厚度从 4 mm 增加到 6 mm 时,温度降低作用减弱;随着肋片厚度增加,石蜡熔化速度变缓,石蜡总的液相率呈现先增加后降低的趋势。

从图 4(a)和图 4(b)可以看出,随着肋片厚度的增加,储热板表面温度降低,温差变小。这是由于随着肋片厚度的增加,肋片与基板的接触面积增加,肋片扩散热量的能力随之增强;同时肋片增厚,石蜡体积减小,这也会导致总的潜热减少。当肋片导热量的增加大于石蜡潜热的减少时,储热板表面温度会降低,温差变小。当肋片增加到一定厚度、肋片导热量的增加等于潜热的减少时,储热板表面温度将保持不变。若再继续增加肋片的厚度,将会引起储热板表面温度的升高和温差的增大。

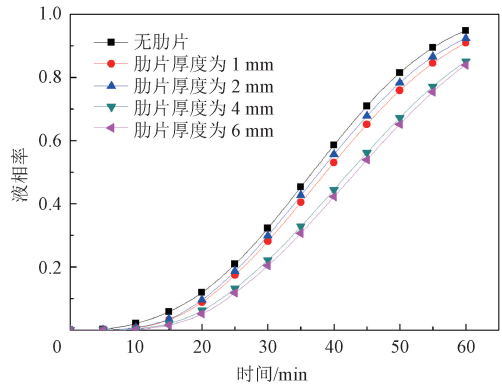
从图 4(c)可以看出,随着肋片厚度增加,石蜡的熔化速度开始变缓。当肋片厚度从 1 mm 增加到 2 mm 时,石蜡总的液相率增加;随着肋片厚度继续增加,液相率又降低。这是因为当肋片厚度较小时,石蜡的体积较大,总的潜热较大,换热



(a) 凸台 U2 表面温度分布



(b) 凸台 U2 与储热板表面平均温差分布



(c) 石蜡液相率分布

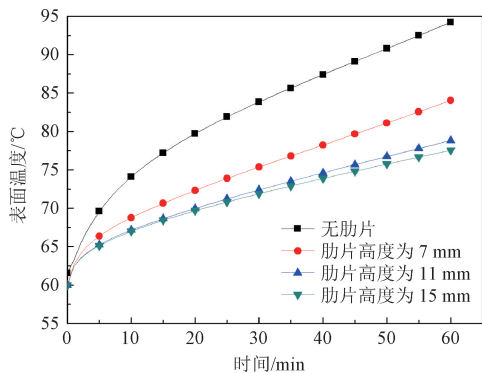
图 4 不同肋片厚度对换热的影响曲线图

过程以石蜡的相变换热为主,当肋片厚度增加时,肋片扩散热量的能力增强,与肋片接触的石蜡更快进入熔化阶段,熔化过程加快导致石蜡总的液相率增加。当肋片厚度继续增加时,肋片的导热和储热能力逐渐增强,在传热过程中起主要作用,各个区域内的石蜡达到熔点的速度变慢,因此导致石蜡总的液相率降低。

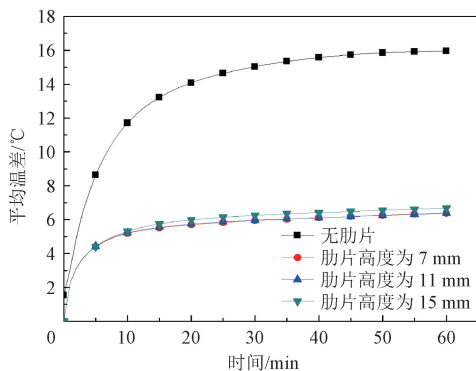
4.3 肋片高度对换热的影响

在储热板尺寸一定时,分别对肋片数量和厚

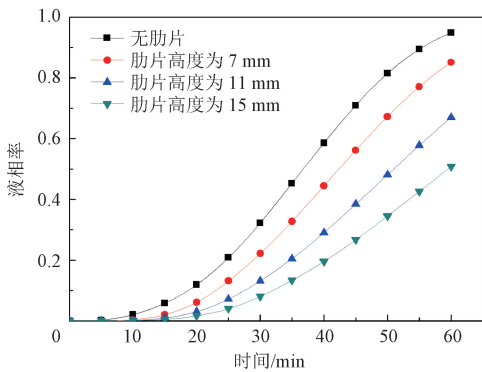
度相同、肋片高度不同的储热板的换热性能进行数值仿真。设肋片数量为9,肋片厚度为7 mm,肋片高度分别为7,11,15 mm。不同肋片高度对换热的影响曲线如图5所示。



(a) 凸台U2表面温度分布



(b) 凸台U2与储热板表面平均温差分布



(c) 石蜡液相率分布

图5 不同肋片高度对换热的影响曲线图

数值仿真结果表明:随着肋片高度的增加,凸台U2表面温度降低;当肋片高度从7 mm增加到11 mm时,凸台表面温度降低明显,而温差几乎不变;继续增加肋片高度到15 mm时,凸台表面温度降低不明显,而温差反而会增大;随着肋片高度增加,石蜡熔化速度变缓导致总的液相率降低。

从图5(a)可以看出,随着肋片高度增加,换

热面积增加,储热板表面温度降低。热量是从基板传递到肋片上,再经肋片传递到相接触的石蜡上。对于高度低一些的肋片,由于石蜡本身的导热率较低,热传递缓慢,会导致肋片局部过热,储热板表面温度升高;对于高度高一些的肋片,由于肋片本身的热容更大、导热效率也更高,热量扩散更快,肋片上热量聚集效应不明显,因此储热板的表面温度更低。

从图5(b)可以看出,增加肋片高度对温差几乎不起作用。但当肋片高度增加到15 mm时,温差反而会增大。由于当肋片高度增加到一定程度时,石蜡潜热增加,某些区域石蜡未完全进入液相状态,储热板上部和下部温度分布不均导致温差增大。

从图5(c)可以看出,在同一位置处,肋片较高的储热板的石蜡液相率较低。当工作到60 min时,肋片高度为15 mm的储热板石蜡液相率为0.5,这说明有一半的石蜡未进入液相状态。由于增高肋片会增加石蜡的体积,总的潜热增加。随着工作时间增加,储热板的均温作用会更明显。同时,石蜡熔化速度开始变缓,这是由于肋片高度增加,导致肋片热容增加,在肋片高度上温度梯度减小,处于储热板底部的石蜡温度无法快速升高达到其熔点,从而使总的液相率降低。

5 结论

本文通过数值仿真方法,研究了矩形导热肋片的数量、高度及厚度等参数对相变储热板换热性能的影响。在储热板外形尺寸一定时,增加肋片数量、肋片厚度和肋片高度都能改善储热板的换热性能,但是各参数都存在最佳值。本文得出的结论主要有以下几个方面:

a) 矩形导热肋片在强化相变材料换热过程中起到了重要的作用,其参数变化会影响换热性能,在储热板传热过程中,前期热传导起主要作用,后期热对流起主要作用;

b) 增加肋片数量,可使储热板表面温度降低、温差减小,当肋片数量增加到一定值时,将无法改善储热板的性能,甚至会使储热板表面温度升高,这主要是因为肋片增多虽提高了导热率,改善了储热板前期传热过程,但是阻碍了石蜡的对流,影响了后期换热;

c) 增加肋片厚度,可使储热板表面温度降低、温差减小,当肋片厚度从 1 mm 增加到 2 mm 时,换热性能改善作用不明显,当肋片厚度达到 6 mm 时,换热性能改善作用降低,同时随着肋片厚度增加,石蜡开始熔化的时间推迟,总的液相率呈现先增加后降低的趋势;

d) 增加肋片高度,可使储热板表面温度降低,石蜡开始熔化的时间随着肋片高度增加而推迟,石蜡体积增加,总的潜热增加,储热板的工作时间变长。

参考文献

[1] SAHOO S K, DAS M K, RATH P. Application of TCE-PCM based heat sinks for cooling of electronic components: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 59: 550-582.

[2] 尹本浩, 刘芬芬, 王延. 弹载电子设备相变热沉装置散热性能研究[J]. *电子机械工程*, 2015, 31(6): 6-10.

[3] ALAWADHI E M, AMON C H. Performance analysis of an enhanced PCM thermal control unit [J]. *Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems: Proceedings of the Intersociety Conference*, 2000, 1: 283-289.

[4] NAYAK K C, SAHA S K, SRINIVASAN K, et al. A numerical model for heat sinks with phase change materials and thermal conductivity enhancers [J]. *International Journal Heat Mass Transfer*, 2006, 49(11/12): 1833-1844.

[5] 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: Transaction of the ASME*, 2008, 130(3): 112-115.

[6] HOSSEINIZADEH S F, TAN F L, MOOSANIA S M. Experimental and numerical studies on performance of PCM-based heat sink with different configurations of internal fins [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(17/18): 3827-3838.

[7] PAKROUH R, HOSSEINI M J, RANJBAR A A. A parametric investigation of a PCM-based pin fin heat sink [J]. *Mechanical Sciences*, 2015, 6: 65-73.

[8] 郭茶秀, 张务军, 魏新利, 等. 板式石蜡储热器传热的数值模拟[J]. *能源技术*, 2006, 27(6): 243-248.

[9] 何宜谦, 杨海天. 基于 Sigmoid 函数光滑化的等效热容和有限元法求解相变传热问题[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(5): 817-829.

(上接第 25 页)

[2] TANG R J, ZUO Y X, LIU W Y, et al. Efficient energy-based orthogonal matching pursuit algorithm for multiple sound source localization with unknown source count [J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(4): 045018.

[3] LIU H Y, BARBER R F. Between hard and soft thresholding: optimal iterative thresholding algorithms [J]. *Information and Inference: A Journal of the IMA*, 2020, 9(4): 899-933.

[4] WANG Y, YIN W, ZENG J S. Global convergence of ADMM in nonconvex nonsmooth optimization [J]. *Journal of Scientific Computing*, 2019, 78: 29-63.

[5] MOUSAVI A, PATEL A B, BARANIUK R G. A deep learning approach to structured signal recovery [C]// 2015 53rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2015: 1336-1343.

[6] ZHANG J, GHANEM B. ISTA-Net: interpretable optimization-inspired deep network for image compressive sensing [C]// 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, USA. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2018: 1828-1837.

[7] 石武祯. 图像和视频的深度压缩感知 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

[8] 卢辉煌, 邹伟东, 李钰祥. 基于动态步长交替方向乘法正则化极限学习机 [J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2024, 41(3): 264-273.

[9] TIAN C W, ZHENG M H, ZUO W M, et al. Multi-stage image denoising with the wavelet transform [J]. *Pattern Recognition*, 2023, 134: 109050.

[10] ZHANG X J, MA Y, LIU Y H, et al. Robust DNN-based recovery of wideband spectrum signals [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(10): 1712-1715.