

三套管式相变蓄热器分形肋片设计及(火积)耗散分析

赵明¹, 田扬², 胡明禹¹, 张峰鸣¹

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘要:通过数值模拟的方法,根据分形原理设计了三套管式相变蓄热器的肋片并分析其蓄、放热特性,运用(火积)耗散原理对其蓄、放热过程进行分析。结果表明:相比其他结构的相变蓄热器,安装分形肋片的相变蓄热器可使蓄、放热时间缩短,效率提高;模型2(T形分形模型)和模型3(Y形分形模型)比模型1(直肋模型)的蓄热时间分别缩短了35.64%和33%,放热时间分别缩短了47.65%和43.4%;模型2和模型3相比模型5(2倍填充直肋模型)所需蓄、放热时间基本接近,说明分形设计只需较低的金属填充量便可达到很好的蓄、放热效果;安装分形肋片的相变蓄热器在蓄、放热过程中(火积)耗散率(或其绝对值)下降更快,可逆性更好,换热效率更高。

关键词:数值模拟;分形;相变蓄热;(火积)耗散

中图分类号:TK124 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.02.020

[引用本文格式]赵明,田扬,胡明禹,等.三套管式相变蓄热器分形肋片设计及(火积)耗散分析[J].热能动力工程,2020,35(2):148-154. ZHAO Ming, TIAN Yang, HU Ming-yu, et al. Fractal fins design and entransy dissipation analysis of three-tube type phase change thermal accumulator[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(2): 148-154.

Fractal Fins Design and Entransy Dissipation Analysis of Three-Tube Type Phase Change Thermal Accumulator

ZHAO Ming¹, TIAN Yang², HU Ming-yu¹, ZHANG Feng-ming¹

(1. College of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093; 2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: With numerical simulation method, the fins of the three-tube type phase change thermal accumulator were designed by fractal principle, and the thermal storage and release characteristics of accumulator were analyzed. At the same time, the entransy dissipation theory was used to analyze the process of thermal storage and release. Results show that compared with other types of accumulator, phase change thermal accumulators with fractal fins reduce the thermal storage and release time and increase efficiency. Thermal storage time of model 2 (T-shaped fractal model) and model 3 (Y-shaped fractal model) were reduced by 35.64% and 33%, respectively, compared with model 1, while the thermal release time was reduced by 47.65% and 43.4%, respectively. Model 2 and model 3 are relatively close to the storage and release time of model 5 (2 times filling straight-fin model), indicating that the fractal design requires a lower metal filling amount to achieve a good thermal storage and release effect. The phase change thermal accumulator with fractal fins has a faster drop of entransy dissipation rate (or absolute value), better reversibility and higher heat exchange efficiency during the process of thermal storage and release.

Key words: numerical simulation, fractal, phase change thermal storage, entransy dissipation

收稿日期:2019-03-12; 修订日期:2019-05-02

基金项目:国家自然科学基金(51306120)

Fund-supported Project: National Natural Science foundation of China(51306120)

作者简介:赵明(1975-),女,江苏徐州人,上海理工大学副教授, E-mail:lightzm@126.com.

引言

相变蓄热技术是利用相变材料(Phase Change Materials, PCM)相变时吸收与放出潜热,从而达到能量的储存与释放。利用相变蓄热技术设计的相变蓄热器具有结构简单,制作方便等优势,但相变材料本身导热系数较低,因此为了提高蓄热效率,对相变蓄热器内部结构进行优化有十分重要的意义。

在蓄热器肋片结构设计方面,Ismail 等人^[1]通过实验和数值模拟结合的方法研究了套管蓄热器安装直肋对放热过程的影响,结果表明肋片长度,肋片个数及肋厚都对放热过程有明显的影。Yuan 等人^[2]通过数值方法研究了套管蓄热器肋片安装角度对蓄放热特性的影响,结果表明竖直安装肋片能更为有效地提升蓄放热效率。胡志培等人^[3]通过数值模拟方法研究了非等高阶梯型肋片对套管式蓄热器蓄热过程的影响,结果表明添加阶梯型肋片可以使融化速率趋于均匀,有效地强化了换热。

分形学是20世纪70年代开始建立的一种研究不规则结构的科学理论,现已在流动与传热领域得到广泛应用。Kiwans 等人^[4]利用分形原理定量研究了给定表面积的多孔翅片对传热性能的影响,证明了多孔翅片相对于传统翅片可以更好地提高传热性能。Bejan 等人^[5]应用分形理论研究了相变储能中融化的S曲线。结果表明储能设备中热量沿着树状结构传递,可以有效地提高其传热效率。

另外,(火积)耗散理论被提出后^[6-7],已经被广泛应用于各类流动与换热问题的分析中。陈彦龙等人^[8]基于(火积)耗散原理分析了分布式能源系统中蓄热的相变温度,并采用(火积)耗散极值进行优化,结果表明(火积)耗散极值作为优准则得到的最佳相变温度对应蓄热取热功率的最大值。陶于兵等人^[9]采用数值方法,分析了相变材料的熔点对储热单元的储热速率、(火积)耗散率及储热品质的影响,结果表明对于单级相变储热单元,相变材料熔点越低,相变储热过程的传热速率就越高,而对应的(火积)耗散率就越大,储存热量的品质也越低,证明了(火积)耗散原理用于相变储热过程优化的可行性。

本文通过数值模拟的方法,根据分形原理在文

献模型的基础上设计了三套管式相变蓄热器的肋片并分析其蓄、放热特性,同时运用(火积)耗散原理对其蓄放热过程进行分析。

1 数值模拟

1.1 物理模型

1.1.1 分形肋片

对文献[10]中蓄热器的肋片进行分形设计,得到T形分形肋片,其迭代过程如下:以肋长为 L 的肋片作为0维,将肋片分为两等分(长度为 $L/2$),在每个等分点两侧均加载长度为其与肋长垂直的 aL ($0.1 < a < 0.6$)和 bL ($0.1 < b < 0.6$)得到1维分形肋片。然后将每个分支作为肋长再一次进行2等份划分加载分支,得到2维的分形肋片,分支长度分别为 $l_1, l_2, l_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 。以此类推可以得到 N 维的分形结构,其中分形结构主体肋长及肋厚与0维一致,以同样的原理迭代得到Y形分形肋片,迭代过程如图1所示。

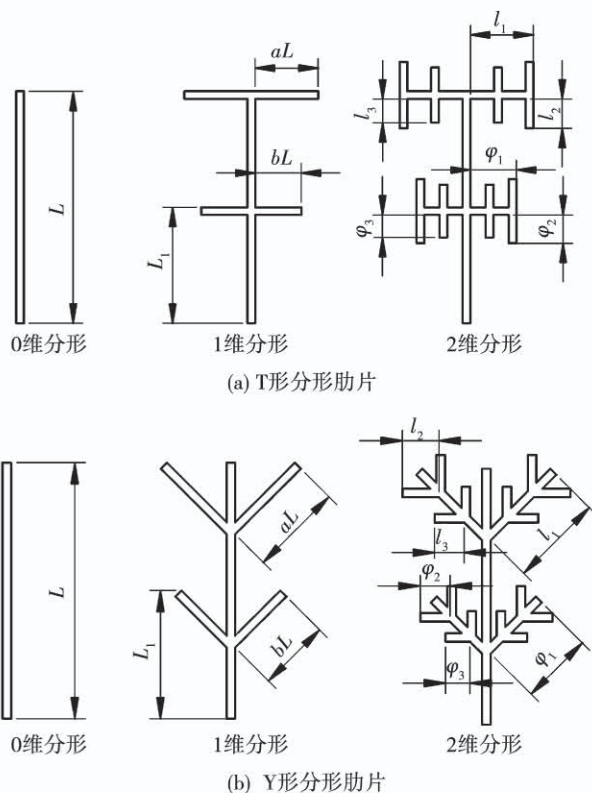


图1 分形肋片迭代示意图

Fig. 1 Fractal fin iteration diagram

为便于讨论,参照文献[11]将分形结构定为2维(其中取 $a = 0.33, b = 0.25$),分形肋片具体尺寸

如表 1 所示。

表 1 分形肋片尺寸 (mm)
Tab. 1 Fractal fin size (mm)

L	L_1	l_1	l_2	l_3	φ_1	φ_2	φ_3
30	15	9.9	3.267	2.475	7.5	2.475	1.875

由肋片分形结构生成过程可知,第 m 维与第 $(m+1)$ 维单元的长度之比为:

$$\gamma = \frac{aL + bL}{L} = 0.58 \tag{1}$$

按照分形维数的定义^[12],两种分形肋片的分形维数均为:

$$O = \frac{\ln N}{\ln(1/\gamma)} = 2.5449 \tag{2}$$

其中, N 取 4。

1.1.2 蓄热器

蓄热器物理模型简图如图 2 所示,模型 1 为根据文献[10]设计的直肋模型,肋片长 30 mm,肋厚 1 mm;模型 2 为安装 T 形分形肋片模型;模型 3 为安装 Y 形分形肋片模型;在研究过程中为了排除金属填充量对蓄、放热过程的影响,模型 4 是与模型 2、模型 3 具有相同金属填充量的直肋模型,模型 5 是具有 2 倍金属填充量的直肋模型,两者除肋厚与模型 1 不同外,肋片长度及安装方式均与模型 1 相同。蓄热器内套管直径 D_{in} 为 50 mm,相变材料区域直径 D_{out} 为 150 mm。

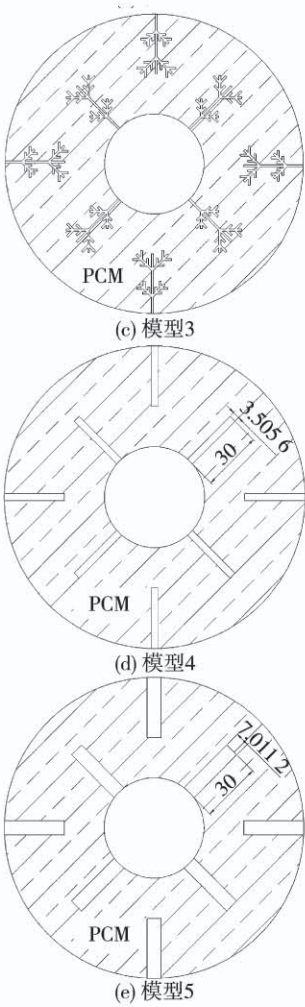


图 2 相变蓄热器物理模型简图 (mm)
Fig. 2 Physical model diagram of phase change thermal accumulator (mm)

1.2 数学模型

考虑到相变材料的融化,在计算区域建立二维的连续性方程、动量方程和能量方程,材料相变采用焓法模型,引入热焓,不考虑内部热源,其中将焓和温度作为待求参数。

连续性方程:

$$\nabla \cdot \vec{v} \tag{3}$$

动量方程:

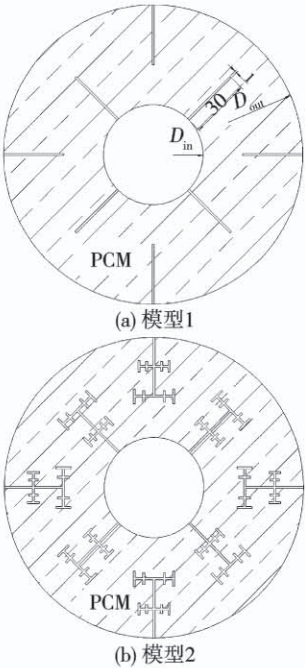
$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = \frac{1}{\rho} (-\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \beta \vec{g} \cdot (T - T_{ref})) + \vec{S}_g \tag{4}$$

能量方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} H) = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla H \right) \tag{5}$$

其中,潜热焓值为:

$$\Delta h = f \Gamma_p \tag{6}$$



显热焓值为:

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT$$

(7)

相变材料总焓为:

$$H = h + \Delta h$$

(8)

式中: $\vec{v}$ —液相区域流速, m/s ; t —时间, s ; ρ —相变材料密度, kg/m^3 ; p —压力, Pa ; μ —相变材料动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; β —相变材料体胀系数, K^{-1} ; $\vec{g}$ —重力加速度, m/s^2 ; T —相变材料温度, K ; T_{ref} —参考温度, K ; λ —相变材料导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; c_p —相变材料比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; Γ_p —相变潜热, J/kg ; h_{ref} —参考焓值, kJ/kg ; f —液相分数, 其定义如下:

$$\begin{cases} T < T_s, f = 0 \\ T > T_l, f = 1 \\ T_s < T < T_l, f = \frac{t - T_s}{T_l - T_s} \end{cases}$$

(9)

式中: T_s —固态临界温度, K ; T_l —液态临界温度, K ; $\vec{S}_g$ —源项。

$$\vec{S}_g = \frac{(1 - \beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon} A_{\text{mush}} \vec{v}_p$$

(10)

式中: A_{mush} —模糊区常数, 反映相变前沿形态, 取 10^5 ; ε —取 0.000 1, 为了防止分母为零导致计算溢出; $\vec{v}_p$ —脱离模糊区域的牵引速度, m/s 。

1.3 边界条件及初始条件

蓄热过程中, 内、外部边界温度 $T_w = 363.15 \text{ K}$, 初始温度 $T_{\text{init}} = 300.15 \text{ K}$ 。

放热过程中, 内、外部边界温度 $T_w = 303.15 \text{ K}$, 初始温度 $T_{\text{init}} = 360.15 \text{ K}$ 。

1.4 物性条件

相变材料相变过程中采用层流模型, 为低速非稳态不可压流动过程; 相变材料和管壁材料为均质和各向同性; 不考虑粘性耗散, 密度采用 Boussinesq 假设, 物性参数如表 2 所示。

表 2 物性参数表

Tab. 2 Physical property parameter table

参 数	RT82	Cu
固体密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	950	8 978
液体密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	770	
定压比热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	2 000	381
相变潜热/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	176 000	
相变温度/ K	358.15	
热导率/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.2	387.6
动力粘度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	0.034 99	

1.5 数值计算方法与模型考核

采用 ANSYS Fluent 软件进行数值计算, 引入基于焓值方法的 Solidification & Melting 模型处理材料相变过程, 物性参数采用 UDF 实现。速度与压力求解方法采用非稳态隐式 SIMPLEC 算法, 压力项采用 PRESTO 方法离散, 对流项采用 QUICK 格式离散, 能量为一阶迎风格式。压力、密度、速度、液相分数和能量松弛因子分别设为 0.3、1、0.7、0.4 和 1。

模型采用结构化网格, 对内部近壁面(包括肋片)边界网格进行加密。对比网格数为 48 900、72 434 及 112 500 时液相分数与 PCM 平均温度的变化情况。经过考核, 最大计算误差分别为 2.5% 和 3.3%, 选用网格数目为 72 434。

在网格数为 72 434 时, 对比时间步长 0.05、0.10 和 0.20 s 时液相分数与 PCM 平均温度的变化情况。经过考核, 最大计算误差分别为 1.5% 和 2.1%, 选择 0.1 s 作为时间步长进行后续计算。

与此同时, 采用模型 1 蓄热过程模拟结果与文献[10]中实验数据进行对比, 最大误差为 4.43%; 另外对比了模型 1 放热过程模拟结果与文献[13]中实验数据, 最大误差为 3.97%, 如图 3 所示, 模型验证正确。

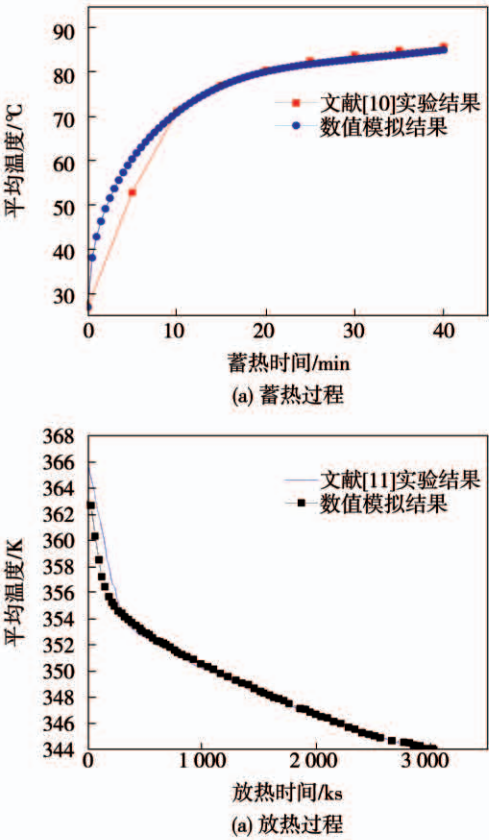


图 3 模拟数据与文献实验数据验证结果
Fig. 3 Simulation data and literature experimental data verification results

2 结果与分析

2.1 蓄热过程模拟及(火积)耗散

模拟相变蓄热器模型 1、模型 2 和模型 3 的蓄热过程,图 4 为其液相图和温度场。从图中可知,不同模型蓄热过程均可分为 3 个阶段。阶段 1:由于导热作用,肋片附近相变材料率先融化,此区域内温度较高;阶段 2:随着蓄热过程的进行,肋片附近液态薄层增厚,导热热阻增加,自然对流占主导地位,蓄热器上部区域及上部肋片区域自然对流强烈,温度较高;阶段 3:随着蓄热过程的持续发展,蓄热器上部多数区域已经融化,仅残留下部两侧的一些区域温度较低,难以融化。相较于模型 1,安装分形肋片的模型 2 和模型 3 不仅增加了导热面积,还可使热量更快地导入相变材料区域,使蓄热器内部温度分布更为均匀,融化效率明显提升。

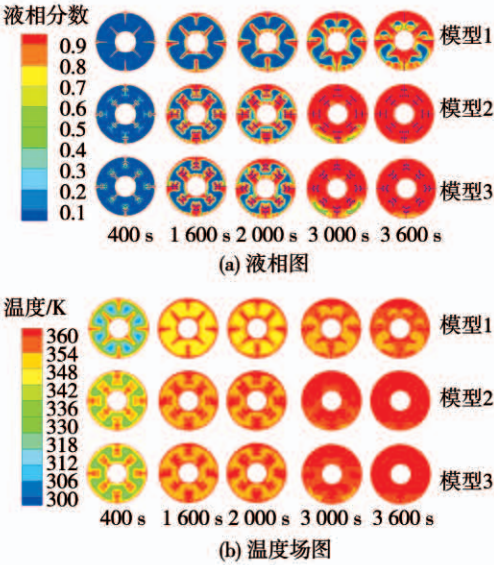


图 4 3 种模型蓄热过程液相图及温度场图
Fig. 4 Liquid contour and temperature contour during the heat storage process for the three different models

为了排除导热材料使用量对蓄热过程的影响,在保持模型设计结构(除肋片厚度)不变的情况下,设计出了肋片金属填充量与两种分形结构相同的模型 4 以及金属填充量为分形结构 2 倍的模型 5,已在图 2 展示。经模拟计算,所有模型的液相分数变

化情况如图 5 所示。

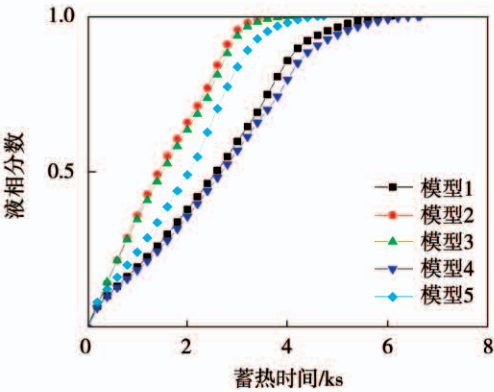


图 5 蓄热过程各模型液相分数变化
Fig. 5 Variation of liquid fraction during the heat storage process for different models

从图 5 可以明显看出,安装分形肋片的蓄热器相较于安装直肋的蓄热器可以明显缩短蓄热时间。模型 2 和模型 3 比模型 1 的蓄热时间分别缩短了 35.64% 和 33%,而具有相同金属填充量的模型 4 和模型 1 的蓄热时间基本相同,因此可以排除金属填充量对蓄热过程的影响。与此同时,虽然 2 倍金属填充量的模型 5 与分形模型所用蓄热时间接近,但这种方法是以牺牲相变材料填充量为代价的。因此,可以看出安装分形肋片的蓄热器相较于其他相同结构的蓄热器蓄热时间短,效率高而且所需金属填充量较低。

为了更好地分析安装分形肋片对蓄热过程的影响,引入(火积)耗散理论,其中(火积)的定义为:

$$G = \frac{1}{2}QT \tag{11}$$

式中:G—(火积)耗散量,kW/K;Q—热流量,kW。

根据文献[9],蓄热过程(火积)耗散率越小,下降速率越快,代表蓄热过程的可逆性更好,效率更高。图 6 为不同模型蓄热过程的(火积)耗散率变化情况,从图中可以明显看出,分形模型和 2 倍金属填充模型虽然在蓄热的前期(火积)耗散率较大,但随着蓄热过程的进行,(火积)耗散率的下降速率更快。但从前文的分析已知,2 倍填充的模型是以牺牲相变材料填充量为代价的,因此分析得出分形模型在蓄热过程可逆性更好,换热效率更高。

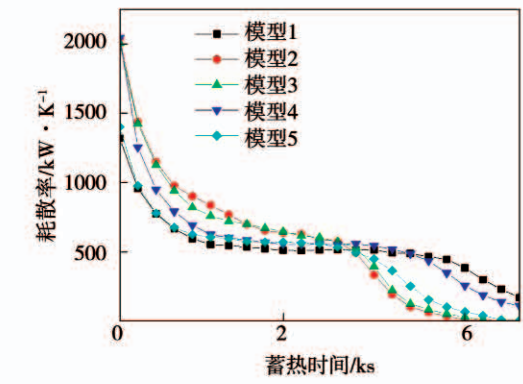


图 6 蓄热过程各模型(火积)耗散率变化

Fig.6 Variation of entransy dissipation in the heat storage process for different models

2.2 放热过程模拟及(火积)耗散

模拟相变蓄热器模型 1、模型 2 和模型 3 的放热过程,如图 7 所示。从图中可知,不同模型放热过程同样可分为 3 个阶段。阶段 1:导热作用使得肋片附近的液态相变材料率先凝固,此区域内温度较低;阶段 2:随着放热过程的进行,固态相变材料逐渐增多,由于自然对流的作用,肋片下部区域会率先凝固,此区域内温度较低;阶段 3:高温液态相变材料几乎呈上下对称状分布,但上部略多并形成难以凝固的多块液态区域。相较于模型 1,安装分形肋片的模型 2 与模型 3 温度场分布更为均匀,放热效率得到明显提升。

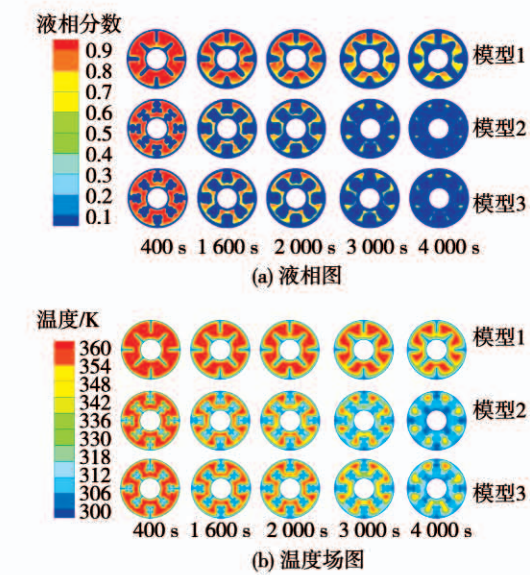


图 7 3 种模型放热过程液相图及温度场图

Fig.7 Liquid contour and temperature contour in the heat release process for the three different models

同时对模型 4 和模型 5 的放热过程进行了模拟。所有模型放热过程的液相分数变化情况如图 8 所示。

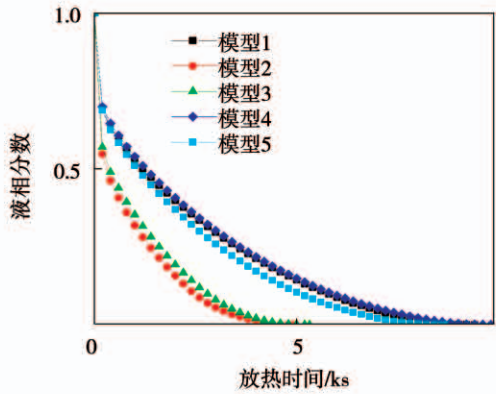


图 8 放热过程液相分数变化

Fig.8 Variation of liquid fraction in the heat release process for different models

从图 8 可以看出,放热过程与蓄热过程类似,蓄热器安装分形肋片后可以更为明显缩短放热时间。模型 2 和模型 3 比模型 1 的放热时间分别缩短了 47.65% 和 43.4%,而具有相同金属填充量的模型 4 与模型 1 的放热时间也基本一致,因此可以排除金属填充量对放热过程的影响。与此同时,2 倍金属填充量的模型 5 与模型 1 放热时间上也没有明显的差距。因此,通过放热过程同样可以看出安装分形肋片的蓄热器具有高效率 and 低金属填充量的优点。

图 9 为不同模型放热过程的(火积)耗散率的变化。

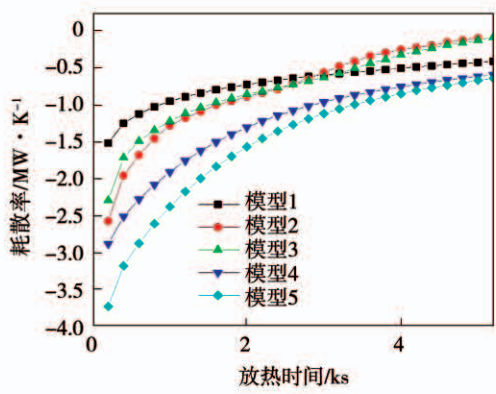


图 9 放热过程各模型(火积)耗散率变化

Fig.9 Variation of entransy dissipation in the heat release process for different models

从图中可以看出,与蓄热过程一致,两类分形模型虽然在前期(火积)耗散率绝对值较大,但随着放热过程的进行,(火积)耗散率绝对值下降的速度明显加快,而且其耗散率绝对值也明显减小。因此在放热阶段分形模型的可逆性更好,换热效率更高。

3 结 论

(1) 相比其他结构的蓄热器,安装分形肋片的相变蓄热器使得蓄、放热时间缩短,效率提高,而且只需较低的金属填充量。模型 2 和模型 3 比模型 1 的蓄热时间分别缩短了 35.64% 和 33%;放热时间分别缩短了 47.65% 和 43.4%。

(2) 安装分形肋片的相变蓄热器在蓄、放热过程中(火积)耗散率下降更快,可逆性更好,换热效率更高。

参考文献:

- [1] SMAIL K A R, ALVES C L F, MODESTO M S. Numerical and experimental study on the solidification of PCM around a vertical axially finned isothermal cylinder[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(1): 53–77.
- [2] YUAN Y, CAO X, XIANG B, et al. Effect of installation angle of fins on melting characteristics of annular unit for latent heat thermal energy storage[J]. Solar Energy, 2016, 136: 365–378.
- [3] 胡志培, 孙志高, 孟二林. 阶梯形肋片对套管式相变蓄热器蓄热性能影响的数值研究[J]. 高校化学工程学报, 2018, 32(4): 816–822.
HU Zhi-pei, SUN Zhi-gao, MENG Er-lin. Numerical study of stepped-fin effects on thermal performance of sleeve-tube thermal energy storage units[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2018, 32(4): 816–822.
- [4] KIWAN S, AL-NIMR M A. Using porous fins for heat transfer enhancement[J]. Journal of Heat Transfer, 2000, 123(4): 790–795.
- [5] BEJAN A, ZIAEI S, LORENTE S. The S curve of energy storage by melting[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(11): 114902.
- [6] 过增元, 程新广, 夏再忠. 最小热量传递势容耗散原理及其在

导热优化中的应用[J]. 科学通报, 2003, 48(1): 21–25.

GUO Zeng-yuan, CHENG Xin-guang, XIA Zai-zhong. Principle of minimum heat transfer potential dissipation and its application in thermal conductivity optimization[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(1): 21–25.

- [7] 程新广, 李志信, 过增元. 基于最小热量传递势容耗散原理的导热优化[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(1): 94–96.
CHENG Xin-guang, LI Zhi-xin, GUO Zeng-yuan. Thermal conduction optimization based on the principle of minimum heat transfer potential dissipation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(1): 94–96.
- [8] 陈彦龙, 王 馨, 滕小果. 基于(火积)与熵产分析的最优相变温度研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(9): 1597–1600.
CHEN Yan-long, WANG Xin, TENG Xiao-guo. Optimal phase change temperature based on entransy and entropy generation analyses[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(9): 1597–1600.
- [9] 陶于兵, 何雅玲, 刘永坤. (火积)耗散原理在相变储热过程优化中的应用[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(5): 973–977.
TAO Yu-bing, HE Ya-ling, LIU Yong-kun. Application of entransy dissipation theory in optimization of latent heat storage process[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(5): 973–977.
- [10] AL-ABIDI A A, MAT S, SOPIAN K et al. Experimental study of PCM melting in triplex tube thermal energy storage for liquid desiccant air conditioning system[J]. Energy and Buildings, 2013, 60: 270–279.
- [11] 周文平, 张 卫, 刘金梅. 两种新型树状结构的分形天线研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(20): 5031–5034.
ZHOU Wen-ping, ZHANG Wei, LIU Jin-mei. Study on two novel tree-shaped fractal antennas[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(20): 5031–5034.
- [12] 王兴元, 孟 娟. 分形几何学及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
WANG Xing-yuan, MENG Juan. Fractal geometry and application[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [13] AL-ABIDI A A, MAT S, SOPIAN K et al. Experimental study of melting and solidification of PCM in a triplex tube heat exchanger with fins[J]. Energy and Buildings, 2014, 68: 33–41.

(王治红 编辑)