



引用格式:吕彦力,王建军,郝亚萍,等. 太阳能蓄热单元蓄热过程的数值模拟与优化[J]. 轻工学报,2016,31(2):74-80.

中图分类号:TK512⁺.4 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2016.2.010

文章编号:2096-1553(2016)02-0074-07

太阳能蓄热单元蓄热过程的数值模拟与优化

Numerical simulation and optimization of solar heat storage unit regenerative process

吕彦力,王建军,郝亚萍,袁培

LYU Yan-li, WANG Jian-jun, HAO Ya-ping, YUAN Pei

关键词:

太阳能干燥;相变蓄热;蓄热单元;数值模拟;均匀设计

郑州轻工业学院 能源与动力工程学院,河南 郑州 450002

College of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China

Key words:

solar drying; phase change heat storage; heat storage unit; numerical simulation; uniform design

摘要:基于均匀设计方法设计了6个太阳能蓄热装置,将石蜡 RT110 作为相变材料封装于带内翅片的圆柱管蓄热单元内,建立蓄热单元模型并对其蓄热特性进行研究.结果表明:蓄热单元结构及尺寸对相变材料的蓄热速率有较大影响,并且较小的蓄热单元内径、较多的翅片和较大的翅片高度可以显著增加蓄热量;蓄热单元各因素的二阶交互作用对蓄热单元蓄热能力的影响也很大,其中翅片厚度与翅片个数、圆柱内径协同影响蓄热单元的蓄热能力.

收稿日期:2015-11-30

基金项目:国家自然科学基金项目(21446011,51476148);河南省产学研项目(007014)

作者简介:吕彦力(1955—),男,河南省确山县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为制冷与低温设备的节能技术.

Abstract: Based on the uniform design method, six solar heat storage devices were designed, the phase change material of paraffin RT110 was encapsulated in the heat storage unit of cylindrical tube with inner finned, and the heat storage unit model was established and its heat storage properties were investigated. Results showed that the structure and size of the heat storage unit had a great influence on heat storage rate of phase change materials. The smaller the inner diameter, the more the fins and the longer the fin width, the capacity of heat storage was greater. The capacity of heat storage was influenced greatly by the second-order interaction of various factors. The fin width, the fin number and the inside diameter of cylindricity collaboratively affected the capacity of heat storage unit.

0 引言

干燥作为一道工序广泛应用于工业生产的各个领域,并且是整个生产工艺中的主要耗能环节之一.传统的干燥工序的能量来源为化石燃料,这种干燥方式的能源利用效率较低.随着环境问题和能源问题的日益严重,人们把目光转向以太阳能为代表的清洁能源,使之成为研究的热点.但是由于季节更替、气象参数、地域变迁、昼夜更替等原因,太阳能的稳定性和连续性受到影响,阻碍了太阳能干燥的使用,因此提高太阳能干燥的稳定性和连续性已成为研究的重点.将蓄热装置加入太阳能干燥系统用以克服太阳能以上的缺点是普遍的做法.

相变蓄热具有较大的蓄热密度,已广泛地应用于蓄热领域.目前关于相变蓄热的研究主要集中在蓄热材料的蓄热特性和蓄热装置的优化等方面^[1].朱冬生等^[2]研究了铝翅片管对相变蓄热材料放热性能的影响,通过将有无翅片的蓄热单元进行对比,发现有无翅片对放热特性影响较大,有翅片的蓄热单元凝固所需的时间比无翅片时减少90%,并且铝片对导热系数小于 $0.5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的相变材料的传热过程影响更大;M. Longeon等^[3]设计了同心套管式蓄热装置,载热介质在中心管内流动,环形区域内填充相变蓄热材料,由中心管外壁延伸出的针形肋深入相变材料内,数值模拟结果与实验结果吻合较好,并发现蓄热器结构对充/放能有复杂的影响;郭茶秀等^[4]研究了翅片强化板式石

蜡蓄热器的凝固过程,认为只有当翅片长宽比大于1时,翅片才能对相变蓄热器起到明显强化作用;刘倩平等^[5]研究了一种带有环形内翅片的相变蓄热换热器,结果表明热媒温度与相变材料相变点的温差越大、翅片间距越小,所需融化时间越短.在对相变过程的数值模拟中发现,固、液相的密度差和自然对流是导致自然对流与纯导热模型计算偏差的重要原因^[6].以上研究虽然丰富了相变蓄热过程的流动传热特性,但是针对蓄热设备的结构优化并不深入.鉴于影响蓄热装置的蓄热能力的因素较多,是一个典型的多因素问题,本文拟设计一种用于干燥过程的太阳能蓄热器,并基于均匀设计方法^[7]安排不同尺寸的试验方案,与流体力学的计算方法结合起来,对相似结构蓄热装置的蓄热能力进行多因素、多水平的敏感性分析,以期对蓄热装置的优化提供理论依据.

1 物理模型及简化

1.1 蓄热装置的结构及计算区域

本研究的相变蓄热装置由外壳和带内翅片的圆柱管蓄热单元组成,结构如图1a)所示.外壳结构为正六棱柱管,边长230.94 mm,厚度5 mm,高40 mm.在蓄热单元圆柱体内侧布置一定数量的翅片(图1b)).当载热介质温度高于相变材料的相变温度时,载热介质与相变材料之间产生温差,外层相变材料率先吸收透过圆柱管壁的热量并溶解,之后热量沿着管径向管中心传递;当相变材料温度高于载热介质温

度时,相变材料转换为高温热源,外层相变材料率先透过圆柱管壁释放热量并凝固,之后热量沿着管径向管边缘传递.

为了方便计算,对蓄热装置进行合理简化,仅取1根圆柱管作为蓄热单元进行研究,并且忽略圆柱壁厚.由于圆柱管中心对称,只取1个最小的包裹有内翅片的圆柱管蓄热单元作为计算区域,简化的模型如图1c)所示.

1.2 蓄热单元结构的均匀设计方案

根据蓄热单元特点选用均匀设计表 $U_6^*(6^4)$,将圆柱管内翅片个数(A)、翅片高度(B)、翅片厚度(C)和圆柱管内径(D)作为4个考察因素,每个因素分别取6个水平(分别对应6个模型),其中翅片高度范围为26~36 mm,翅片厚度范围为0.8~1.3 mm,圆柱管内径范围为38~48 mm.按照均匀设计表安排各水平和因素,各个模型参数,即均匀设计方案见表1,各模型横切面如图2所示.

1.3 蓄热单元中材料的物性

本研究蓄热单元翅片采用铜作为材料,所用相变材料为石蜡 RT110,物性参数见表2.

2 数学模型构建

2.1 假设条件

- 1) 石蜡和铜均为各向同性材料;
- 2) 铜的物性参数不随温度变化,石蜡各相的物性参数不随时间变化,石蜡在固液共存区的物性参数(热容、导热系数)为温度的线性函数;

表1 均匀设计方案

Table 1 Uniform design scheme

模型	A/个	B/mm	C/mm	D/mm
模型1	2	28	1.0	48
模型2	3	32	1.3	46
模型3	4	36	0.9	44
模型4	5	26	1.2	42
模型5	6	30	0.8	40
模型6	7	34	1.1	38

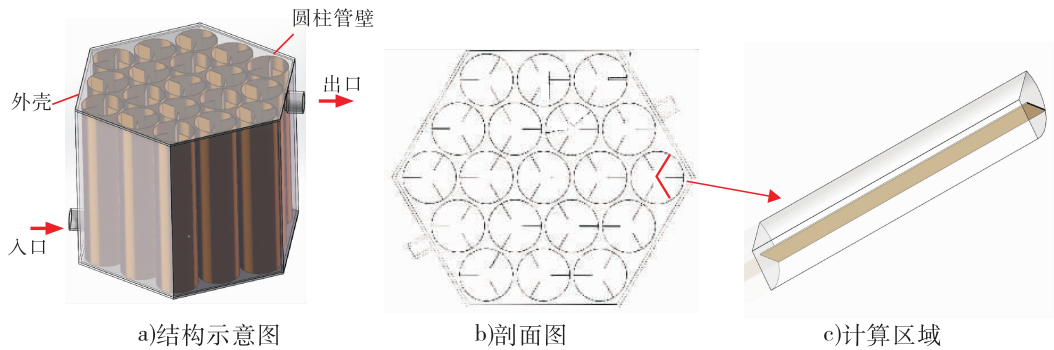


图1 相变蓄热装置结构及计算区域

Fig. 1 Structure of phase heat thermal storage device and computational domain

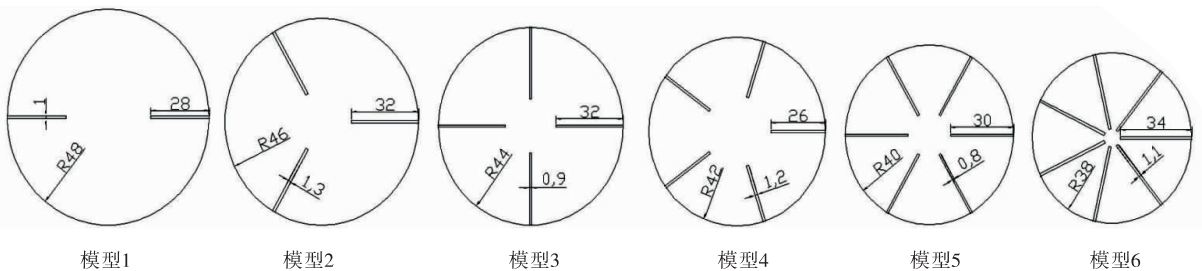


图2 各模型横切面图

Fig. 2 Sectional view of each model

表2 材料物性参数表

Table 2 Physical parameters of materials

材料	熔点/K	相变潜热/(kJ·kg ⁻¹)	热熔/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)		密度/(kg·m ⁻³)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	
			固态	液态		固态	液态
石蜡	385	213.09	1.59	3.68	1 560	0.558	0.355
铜			0.381		8 978	387.6	

- 3) 不考虑接触热阻;
- 4) 忽略圆柱管壁厚;
- 5) 相变过程发生在同一个温度区间内;
- 6) 模型满足 Boussinesq 假设.

2.2 控制方程及边界条件

质量守恒方程:

$$\nabla(\rho_f v) = 0$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho_f v)}{\partial \tau} + \nabla(\rho_f uv) = -\nabla p + \nabla(\mu v) + S$$

能量守恒方程:

$$\rho_f \frac{\partial H}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 T$$

其中,总焓 $H = h + \Delta H$, $\Delta H = \beta L$; 显热焓

$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p dT$; h_{ref} 为参考焓; T_{ref} 为基准温度; C_p 为比热容; 液相体积分数 $\beta = \Delta H / L = (T - T_{\text{solidus}}) / (T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}})$, 即当 $T < T_{\text{solidus}}$ 时, $\beta = 0$, 为固相, 当 $T > T_{\text{liquidus}}$, $\beta = 1$, 为液相; L 为液化潜热.

圆柱管侧面边界条件: $r = r_0$ 时, $T = T_0$, $u = 0, v = 0$

上下壁面边界条件: $x = B$ 时, $\frac{\partial T}{\partial x} = 0, u = 0, v = 0$

时间边界条件: $\tau = 0$ 时, $T = T_{\text{ini}}, u = 0, v = 0$.

2.3 计算方法

采用 ANSYS 自带前处理 Icem 软件生成结构化网格, 为得到与网格独立性无关的解, 对模型 4 采用 3 种网格尺寸划分 (142 688, 158 221

和 167 139) 进行数值计算, 结果表明后两种网格在计算中, 1 000 s 时石蜡的平均温度相差不大于 1%, 综合考虑计算成本和计算精度, 模型 4 采用 158 221 网格进行计算, 其他 5 个模型使用相同的方法分别进行网格独立性考察. 计算时采用 Fluent 软件自带的 Solidification&Melting 模型, 压力和速度耦合采用 SIMPLEC 算法进行求解. 求解为非稳态过程, 当单位时间步长迭代的残差小于 $1.0E-04$ 时, 认为模型收敛.

3 结果与讨论

3.1 融化蓄热规律分析

设定铜翅片和石蜡的初始温度为 353 K, 蓄热圆管内壁的温度为 473 K.

本模型中自然对流对融化过程影响不大, 图 3 为各模型中石蜡剖面在 $t = 600$ s, $t = 1 200$ s 时的温度和液相分布云图, 每个图元左侧为温度分布云图, 右侧为液相质量分数. 其中, 当 $t = 600$ s 时, 模型 6 中的液相质量分数为 0.755, 模型 1 中的液相质量分数为 0.293; 当 $t = 1 200$ s 时, 模型 6 中的液相质量分数为 0.928, 模型 1 中的液相质量分数为 0.394. 可见, 在蓄热初始阶段, 虽然各模型中石蜡融化的趋势相同, 但由于各模型的结构尺寸不同, 致使各模型的融化速度相差较大.

各模型中单位质量石蜡蓄热量、速率随时间变化曲线见图 4 和图 5. 由图 4 可知, 在相同的蓄热条件下, 当蓄热单元经历足够长的蓄热时间, 各模型中单位质量石蜡蓄热量极限均达到 $655 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. 当 $t = 1 800$ s 时, 模型 6 的单

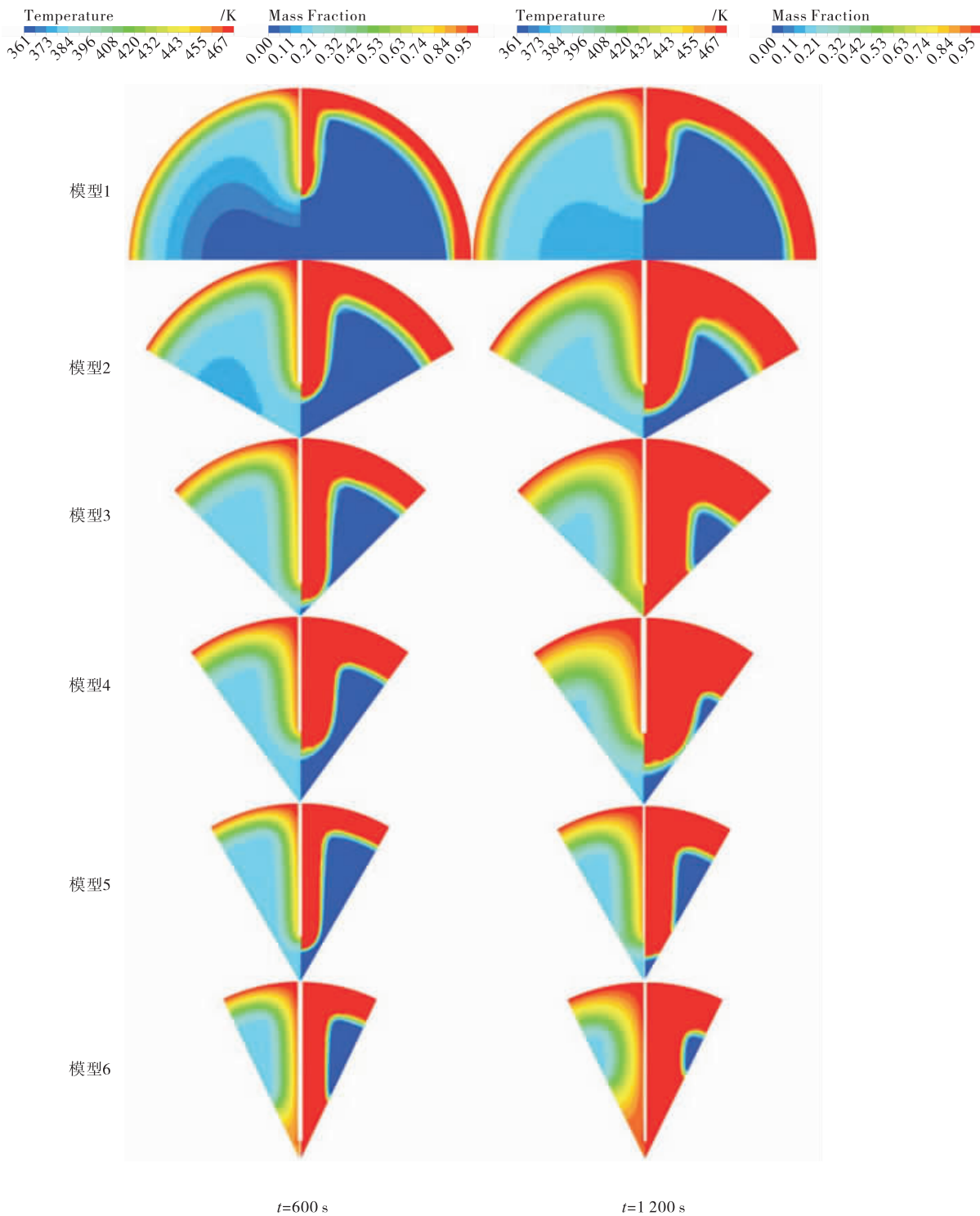


图3 各模型中石蜡剖面温度和液相分布云图

Fig. 3 Temperature & Liquid contours of paraffin in each model

位质量石蜡蓄热量为 $582.8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，模型1 的单位质量石蜡蓄热量为 $235 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，模型6 是模型1 的2.48倍。由图5可以看出，各模型的结构尺寸虽有差别，但是蓄热速率都呈随时

间增加而减小的趋势，这是由于随着蓄热过程的深入，蓄热单元内石蜡的温度升高，石蜡与高温热源的温差减小，圆筒壁的热流密度减小所致。虽然如此，但各模型的蓄热速率仍然有很大

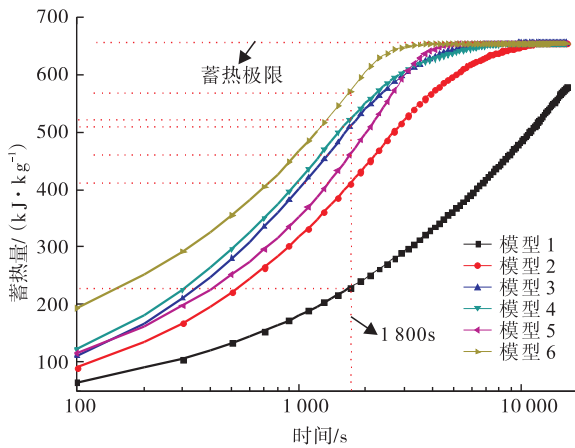


图4 各模型中单位质量石蜡蓄热量随时间变化曲线

Fig. 4 Heat storage changing

curve over time of unit mass of paraffin

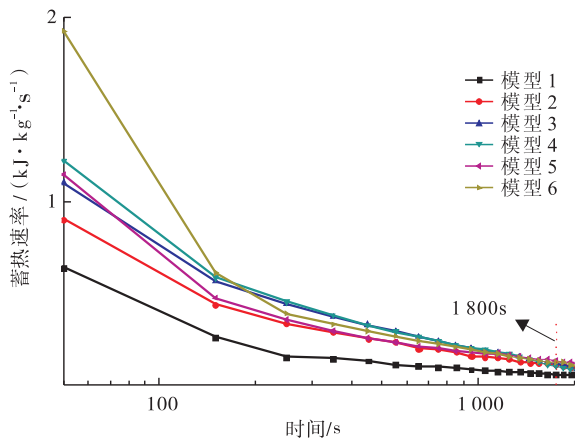


图5 各模型中单位质量石蜡蓄热速率随时间变化曲线

Fig. 5 Heat storage rate changing

curve over time of unit mass of paraffin

差别,其中 $t = 50 \text{ s}$ 时,模型6的单位质量石蜡蓄热速率为 $1.93 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,模型1的单位质量石蜡蓄热速率为 $0.64 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,模型6是模型1的3倍.由上述分析可知,随着蓄热过程的发展,各模型的蓄热量和蓄热速度趋于一致.蓄热单元的结构尺寸对蓄热单元初始阶段的蓄热影响较大,并且较小的蓄热单元内径、较多的翅片和较大的翅片高度可以显著增加蓄热量.

3.2 蓄热单元结构对蓄热能力影响分析

本蓄热单元用于太阳能干燥系统,当太阳辐射较强时,将多余的能量储存于蓄热单元中.根据干燥系统的实际情况,将30 min内的蓄热单元中单位质量石蜡蓄热量作为考察蓄热装置蓄热能力的标准,各模型蓄热量见表3.本文将蓄热单元的翅片个数、翅片高度、翅片厚度和圆柱管内径作为自变量,用 X 表示;将30 min内的单位质量石蜡蓄热量作为因变量,用 Y 表示.

表3 各模型蓄热量

Table 3 Heat storage quantity of

each model ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)

模型	蓄热量	模型	蓄热量
模型1	234.990 5	模型4	532.234 0
模型2	420.577 9	模型5	473.336 8
模型3	519.578 2	模型6	582.812 2

在考虑各因素之间的二阶交互作用对蓄热单元蓄热能力的影响下,本文使用表面响应方法进行优化,采用向后法二次多项式模型进行回归,回归方程为

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^j b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ij} X_i^2 + \sum_{i < j} \sum_j b_{ij} X_i X_j$$

其中, b_0, b_i, b_{ij} 为多项式系数.

使用SPSS软件进行回归,在回归过程中有必要选择贡献显著的项,排除不重要的项,本文采用向后法来筛选变量.求得回归方程如下:

$$Y = -724.204 + 36.080B - 7.312AB + 4.801AD - 0.260BCD + 0.092ABCD$$

从回归方程中可以看出,因素 C 对蓄热单元的蓄热能力的影响主要是与因素 A 因素 B 协同作用的,这是因为在增加翅片个数和加长翅片高度时,翅片厚度的变化放大了这些因素对石蜡与高温热源铜的接触面积的影响;其他各因素之间的交互作用并不明显.

4 结论

本文基于均匀设计方法设计了6个太阳能

蓄热装置,这些装置将石蜡 RT110 封装于带内翅片的圆柱管蓄热单元内,通过载热介质外掠圆柱管蓄热单元进行蓄热和放热. 建立蓄热单元模型并对其蓄热性能进行研究,以 30 min 内蓄热单元内单位质量石蜡的蓄热量作为考察标准,并考虑二阶和高阶交互作用对蓄热单元蓄热能力的影响进行回归,结论如下.

1) 蓄热单元结构及尺寸对相变材料的蓄热速率有较大影响,并且较小的蓄热单元内径、较多的翅片和较大的翅片高度可以显著增加蓄热量.

2) 蓄热单元各因素的二阶交互作用对蓄热单元蓄热能力的影响很大,其中翅片厚度与翅片个数、圆柱内径协同影响蓄热单元的蓄热能力.

参考文献:

- [1] AGYENIM F, HEWITT N, EAMES P, et al. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (lhtess) [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2010, 14(2): 615.
- [2] 朱冬生,徐婷,杨硕,等. 管翅式热泵相变储能器的数值模拟[J]. *流体机械*,2011(6):53.
- [3] LONGEON M, SOUPART A, FOURMIGUE J F, et al. Experimental and numerical study of annular pcm storage in the presence of natural convection[J]. *Applied energy*,2013,112: 175.
- [4] 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(6):243.
- [5] 刘倩平,丁京伟,齐承英,等. 带有内肋片相变蓄能换热器的数值分析[J]. *河北工业大学学报*,2009(5):56.
- [6] REGIN A F, SOLANKI S C, SAINI J S. Latent heat thermal energy storage using cylindrical capsule: numerical and experimental investigations [J]. *Renewable energy*, 2006, 31 (13): 2025.
- [7] 王元. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京:科学出版社,1994.
- [1] AGYENIM F, HEWITT N, EAMES P, et al. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (lhtess) [J].