

文章编号:1008-1542(2012)05-0453-06

# 铝硅合金相变材料凝固/熔化过程的数值分析

崔海亭, 张 改, 蒋静智

(河北科技大学机械工程学院, 河北石家庄 050018)

**摘要:**利用计算流体力学软件 FLUENT 的凝固/熔化模型,对双层壁圆筒内填充的铝硅合金相变材料的熔化/凝固过程进行了数值模拟,得到了在第 3 类边界条件下圆筒内相变材料在凝固/熔化过程中的动态温度场分布、相界面移动规律及凝固/熔化时间等,对蓄热装置的设计及实验研究提供了重要的参考价值。

**关键词:**相变材料;熔化;凝固;FLUENT

中图分类号:TK02;TK124 文献标志码:A

## Numerical simulation on melting and solidification process of aluminum-silicon alloy

CUI Hai-ting, ZHANG Gai, JIANG Jing-zhi

(College of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

**Abstract:** By using the solidification/melting model of FLUENT software, the melting and solidification process of the aluminum-silicon alloy in a cylinder heat storage with double wall were simulated numerically. Considering the third kind of boundary condition, the dynamic temperature field distribution and the position of the phase interface change moving with time are obtained. And the melting and solidification duration time is also calculated. The results have important reference value for the numerical simulation of the phase change problem and the design of phase change energy storage device.

**Key words:** phase change material; melting; solidification; FLUENT

目前应用于太阳能热发电的储热材料有水、导热油、耐高温混凝土和熔融盐等<sup>[1]</sup>。水作为储热材料储能密度不大,水和导热油在高温下蒸气压很大,使用时需要使用特殊的压力阀等设备,导热油还容易引发火灾,而且价格较贵;耐高温混凝土作为储热材料,对其内部换热管道要求很高,其成本占整个储热系统成本的 45%~55%;熔融盐普遍存在导热系数小、储能密度低及工作温度低等缺陷,从而导致储能系统较为庞大及太阳能热发电的效率较低。与上述储热材料相比,金属特别是某些合金相变储热材料具有储热密度大、热循环稳定性好、导热系数高、性价比良好、不易燃、无毒等优点,在高温相变储热应用中具有较大的优势。笔者利用 FLUENT 软件,针对圆筒形容器内装入铝硅合金<sup>[2-4]</sup>相变材料的凝固/熔化过程进行数值传热分析,为铝硅合金在太阳能高温热利用系统中的实际应用提供了依据。

## 1 物理模型的建立

### 1.1 物理模型

图 1 所示为相变蓄热装置示意图,高  $H=600$  mm,直径  $\Phi=180$  mm。筒壁材料为陶瓷钢铁复合管材,

收稿日期:2012-06-29;修回日期:2012-08-23;责任编辑:张士莹

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50876004);河北省教育厅科学研究计划重点项目(ZH2012079);石家庄科学技术研究与发展计划项目(12124423A)

作者简介:崔海亭(1964-),男,河北蠡县人,教授,博士,主要从事强化传热与热能动力方面的研究。

外层是无缝钢管,材料为20号钢,厚度为10 mm;内层是刚玉,厚度为4 mm。圆筒内装入铝硅合金相变材料,侧面和底面作为传热面,与外界空气进行对流传热。

针对图1的物理模型,为分析简便,进行如下假设:1)相变介质的固相和液相的比热容、导热系数、密度分别为常数,不随温度发生改变;2)相变材料熔化后的流体为牛顿流体,且为不可压缩流体;3)忽略2层筒壁材料以及内层材料与相变材料之间的接触热阻<sup>[5-6]</sup>。

### 1.2 物性参数

文中涉及到3种材料:铝硅合金相变材料、20号钢、氧化铝。其中20号钢和氧化铝属于固体类型,只需输入它们的密度、导热系数、比热容3种属性。而PCM(相变材料)要定义成流体类型,并且发生相变过程,要定义的属性较多,其物性参数值如表1所示。

表1 铝硅合金相变材料物性参数  
Tab.1 Physical properties of Al-Si alloy

| PCM | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 比热容/(kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | 导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | 熔点/°C | 溶解热/(kJ·kg <sup>-1</sup> ) |
|-----|--------------------------|---|--|-------|----------------------------|
| 固态  | 2 250                    | 1 970                                       | 180  | 570   | 450                        |
| 液态  | 2 000                    | 1 740                                       | 70   | —     | —                          |

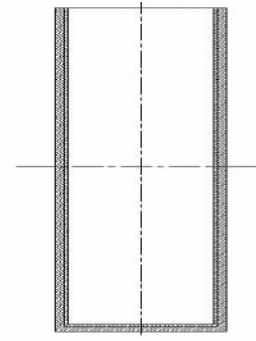


图1 储热装置示意图

Fig.1 Schematic of heat storage device

## 2 数学模型的建立

FLUENT 凝固/熔化模型是以焓为待求变量<sup>[7]</sup>,其基本的能量方程为

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + S,$$

其中

$$\begin{aligned} H &= h + \Delta H, \\ h &= h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT, \\ \Delta H &= \beta L, \\ \beta &= 0 \text{ if } T < T_{\text{固体}}, \\ \beta &= 1 \text{ if } T > T_{\text{液体}}, \\ \beta &= \frac{T - T_{\text{固体}}}{T_{\text{液体}} - T_{\text{固体}}} \text{ if } T_{\text{固体}} < T < T_{\text{液体}}. \end{aligned}$$

式中: $\rho$ 为密度; $t$ 为凝固时间; $H$ 为任意时刻的焓; $h_{\text{ref}}$ 为基准焓(初始焓值); $h$ 为显热焓; $\Delta H$ 为相变潜热项; $L$ 为物质的相变潜热; $\beta$ 为液相率; $c_p$ 为定压比热容; $\kappa$ 为导热系数; $T$ 为任意时刻的温度。

## 3 FLUENT 参数设置

### 3.1 几何模型及网格划分

利用 FLUENT 前处理软件 GAMBIT 建立几何模型并划分网格。容器顶面为绝热壁面,侧面和底面为换热面。内外层筒壁之间的交界面以及相变材料区与内层筒壁之间的交界面无需设置边界类型,FLUENT 默认为耦合界面。运用 GAMBIT 结构化网格 Quad 进行划分,结果如图2所示。

### 3.2 计算参数设置

将 GAMBIT 输出的网格文件导入 FLUENT 求解器中,选择2D分离式(压力基)、时间隐式、非稳态求解器,采用 Solidification & Melting 模型<sup>[8]</sup>。

设定蓄热圆筒的侧面及底面与周围空气为第3类热边界条件,壁面与空气的对流换热系数为80 W/(m<sup>2</sup>·K)。在求解器控制参数的设置面板中设定压力和速度的耦合采用 SIMPLE 算法,为了得到收敛的

解,需降低松弛因子。

为了得到温度及液相率等参数随时间的变化规律,迭代前需要在适当的位置设置监视器。笔者设置了 PCM 区的温度和液相率监视器来监测 PCM 区在整个熔化及凝固过程中的变化情况。初始化后利用 patch 面板指定相变材料区域和固体区域的初始温度,熔化时初始温度为环境温度 298 K,凝固时为 923 K。时间步长的选择不能太大或太小,只要在最大的迭代步数内能够稳定收敛就可以。笔者根据具体情况选择的时间步长为 10~30 s。

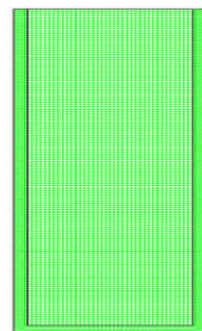


图 2 蓄热装置网格划分

Fig. 2 Mesh of heat storage device

## 4 模拟结果及分析

### 4.1 熔化过程

图 3 是熔化过程中 PCM 区平均温度随时间的变化曲线,图 4 为 PCM 区液相率随时间的变化曲线。过程开始阶段,整个区域包括 PCM 区均为固态导热过程,温度不断升高,且上升速率较快,液相率为零。经过 17 000 s 的固态导热 PCM 开始熔化,整个 PCM 区域的温度基本保持在熔点温度附近不变,材料吸收热量熔化储存潜热而温度却并不升高;待整个相变材料区域全部熔化,即整个 PCM 区域的液相率达到 1.0 之后温度又开始升高,但是温度上升的速度却比熔化前慢,因为 PCM 完全变为液体后导热系数变小;最后整个区域的温度与外界热空气的温度相同,达到热平衡。

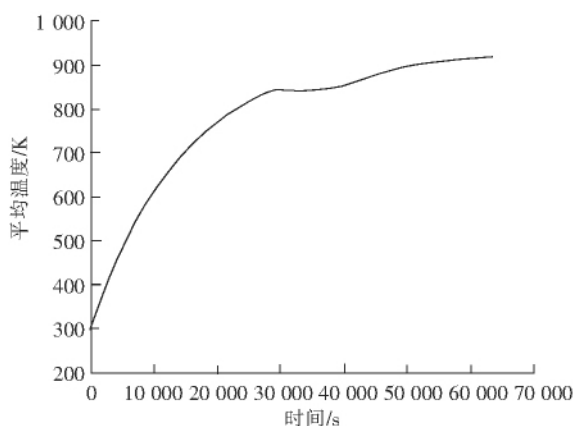


图 3 熔化过程 PCM 区平均温度曲线

Fig. 3 Temperature change on PCM area in melting process

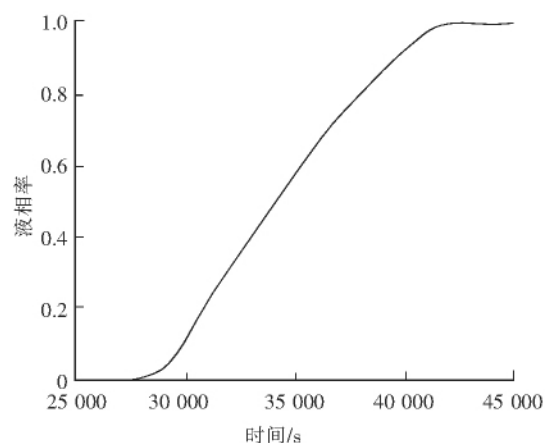


图 4 熔化过程 PCM 区液相率曲线

Fig. 4 Liquid fraction change on PCM area in melting process

图 5 和图 6 分别为熔化时间为 35 000 s 时圆筒内的温度分布图和液相率分布图,此时正处于熔化过程中。由图 5 可知,温度场由外层向内层逐步变化,靠近壁面的部分温度最高,最先熔化,向里温度逐渐降低。而等温线在容器中间向下倾斜是因为热量从侧面和底面而来,且靠近壁面先熔化的相变材料在重力及自然对流作用的影响下,液态介质上升,固态介质下降,导致了等温线的弯曲分布。由图 6 可以看出,随着时间推移,经过 35 000 s 后,PCM 区的相界面位置变化以及熔化区逐渐增加,固体区减少。

图 7 和图 8 分别为熔化时间为 421 000 s 时圆筒内的温度分布图和液相率分布图,此时整个 PCM 区的熔化已完成。由图 8 可知,整个 PCM 区液相率已经达到 1.0,熔化结束后整个温度场分布较先前更均匀。经过 275 000 s 开始熔化到 421 000 s 结束,整个熔化相变过程持续约 243 min。但是从图 7 可知,整个 PCM 区熔化之后,周围的热空气依然与圆筒进行换热,PCM 区会进行液体导热过程,这个过程要比熔化前的固体导热慢很多。因为液体的导热系数要较固体小很多,且传热温差变小,所以曲线变得平缓,PCM 区的温差也变小。

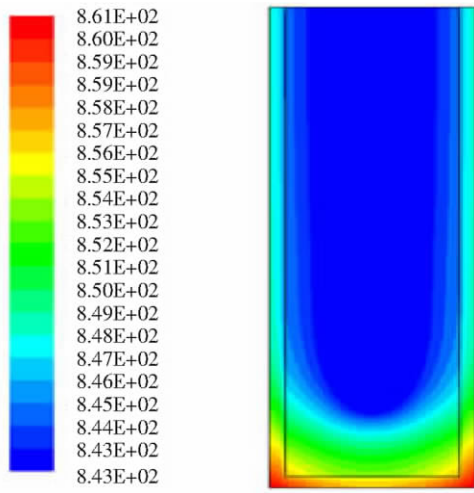


图5 35 000 s时温度分布图

Fig. 5 Temperature distribution at 35 000 s

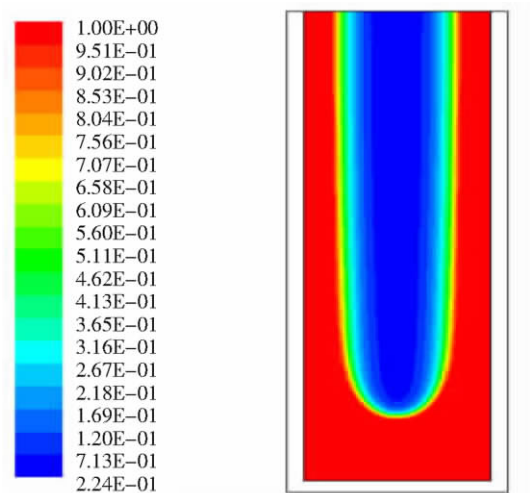


图6 35 000 s时液相率分布图

Fig. 6 Liquid fraction distribution at 35 000 s

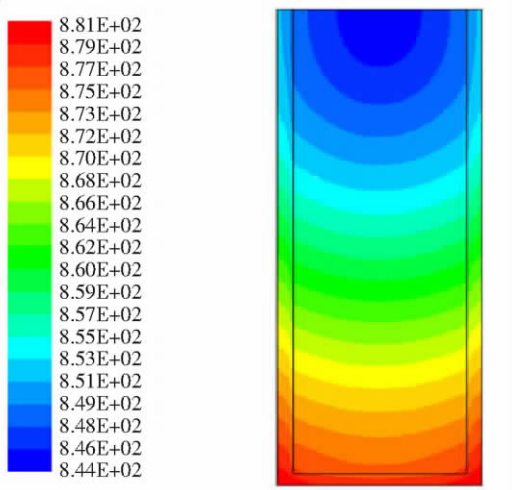


图7 421 000 s时温度分布图

Fig. 7 Temperature distribution at 421 000 s

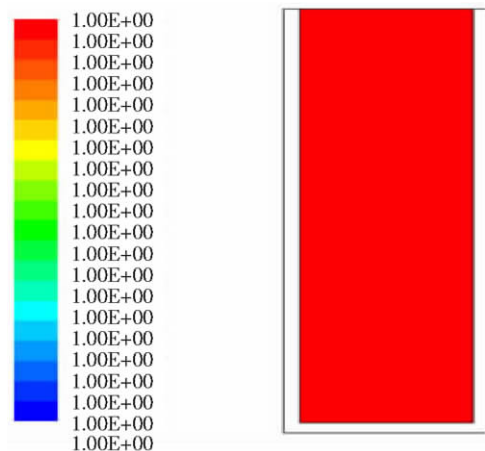


图8 421 000 s时液相率分布图

Fig. 8 Liquid fraction distribution at 421 000 s

## 4.2 凝固过程

凝固过程与熔化过程的计算方法一样,但初始温度条件有所不同,整个计算区域的温度从熔化过程的最高点 923 K 降到与外界冷却空气同温(673 K)。设置参数时,依然利用 patch 面板将固体及 PCM 区的初始温度设为 923 K,周围空气的温度为 673 K。

图 9 为凝固过程中 PCM 区平均温度随时间的变化曲线,图 10 为 PCM 区液相率随时间的变化曲线。由图 9 和图 10 可知,经过液态传热,PCM 开始凝固,温度下降很快,主要是初始阶段传热温差大。凝固过程开始后整个 PCM 区的温度基本保持在凝固点附近,相变材料释放潜热,待整个相变材料区域全部凝固,即整个 PCM 区域的液相率达到 0,之后温度继续下降,虽然固态导热系数比液态大,但是传热温差变小,所以温度下降速率较之前有所减慢,使得曲线趋于平缓,最后与外界冷空气温度相同达到平衡。

图 11 和图 12 分别为凝固时间为 5 000 s 时圆筒内的温度分布图和液相率分布图,凝固相变过程正在进行。靠近冷却壁面的 PCM 温度最低先凝固,温度场由外层向内层变化,大部分区域处于熔化温度,等温线依然受到重力和自然对流的影响而呈现弯曲状。由图 12 可以看出,经过 5 000 s 后,PCM 区的相界面位置变化以及凝固区逐渐增加,同时相变界面也是由外向里逐渐变化的。

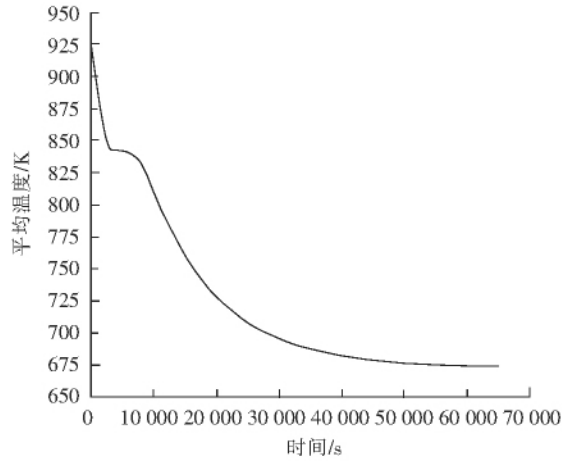


图 9 凝固过程 PCM 区平均温度曲线图

Fig. 9 Temperature change on PCM area in solidification process

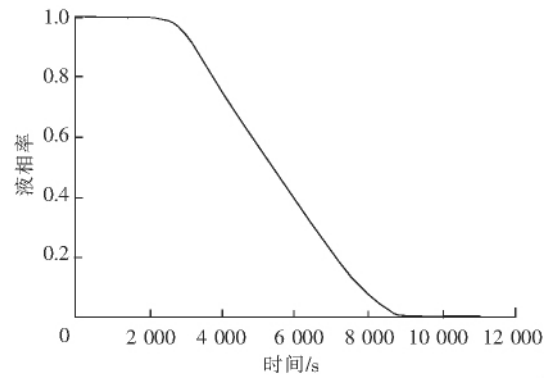


图 10 凝固过程 PCM 区液相率曲线图

Fig. 10 Liquid fraction change on PCM area in solidification process

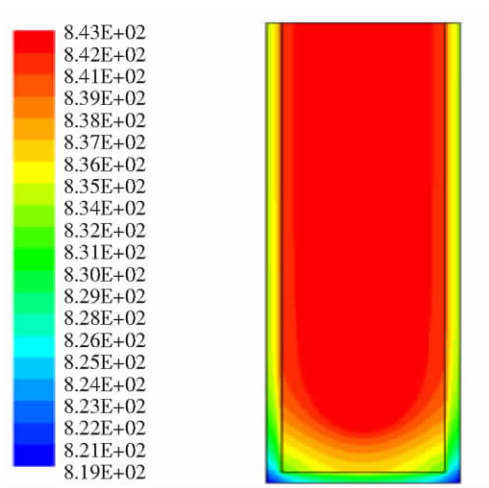


图 11 5 000 s 时温度分布图

Fig. 11 Temperature distribution at 5 000 s

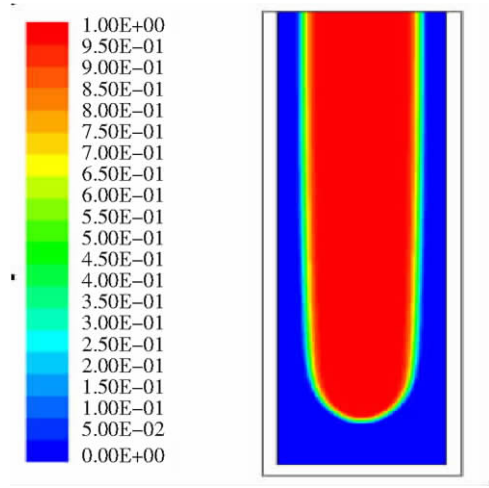


图 12 5 000 s 时液相率分布图

Fig. 12 Liquid fraction distribution at 5 000 s

图 13 和图 14 分别为凝固时间为 10 000 s 时圆筒内的温度分布图和液相率分布图,此时整个 PCM 区的温度已经处于凝固点以下。由图 14 可知,液相率已为零,而从温度分布图看,整个温度场的温度差较大。从

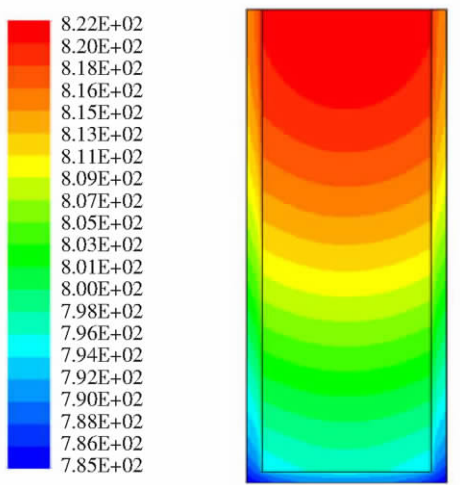


图 13 10 000 s 时温度分布图

Fig. 13 Temperature distribution at 10 000 s

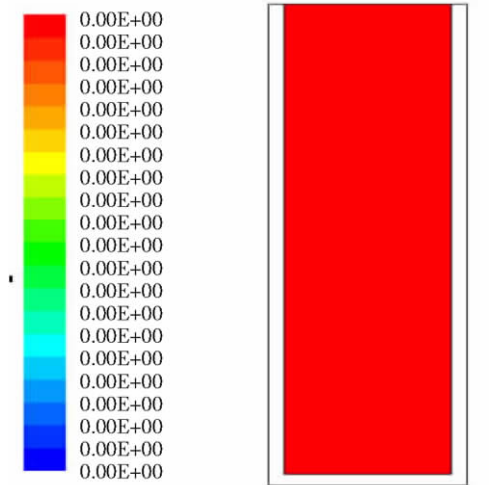


图 14 10 000 s 时液相率分布图

Fig. 14 Liquid fraction distribution at 10 000 s

2 000 s 开始凝固至 9 000 s 凝固完成,整个相变过程持续约 117 min。整个 PCM 区融化之后,周围的冷空气与筒壁面继续对流换热,冷量继续向里传递,进行固体传热过程,直到整个区域温度与冷空气温度一样。

## 5 结 语

运用 FLUENT 前处理软件 GAMBIT 建立了圆筒内充装铝硅合金的模型并划分网格,介绍了运用 FLUENT 凝固/融化模型求解对流热边界条件下相变问题的数学模型和参数设置情况。利用 FLUENT 的监视器功能和强大的后处理功能得到了蓄热器内不同时刻相变材料的温度场分布及液相率随时间的变化曲线及云图,并对结果进行了分析,掌握了其传热规律,为铝硅合金在太阳能高温热利用系统中的实际应用提供了依据。

### 参考文献:

- [1] 朱教群,李圆圆,周卫兵,等. 太阳能热发电储热材料研究进展[J]. 太阳能(Solar Energy),2009(6):29-32.
- [2] 刘 靖,王 馨,曾大本,等. 高温相变材料 Al-Si 合金选择及其与金属容器相容性实验研究[J]. 太阳能学报(Acta Energetica Solaris Sinica),2006,27(1):36-40.
- [3] 张仁元,孙建强,柯秀芳,等. Al-Si 合金的储热性能[J]. 材料研究学报(Chinese Journal of Materials Research),2006,20(2):156-160.
- [4] 陈观生,王波群,张仁元,等. 金属相变储热材料铝硅合金储热特性研究[J]. 材料研究与应用(Materials Research and Application),2012,4(4):255-259.
- [5] 崔海亭,刘凤青,朱金达,等. 高孔隙率泡沫金属对相变蓄热的强化研究[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology),2010,31(2):93-96.
- [6] 郭茶秀,熊辉东,魏新利. 蓄冷球凝固的 FLUENT 数值模拟研究[J]. 低温与特气(Low Temperature and Specialty Gases),2006,24(2):13-16.
- [7] 王瑞金,张 凯,王 刚. FLUENT 技术基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [8] 韩占忠,王 敬,兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004.
- [9] 张林琳,王德武,刘 燕,等. 汽液固三相流化床蒸发器传热余数的计算[J]. 河北工业大学学报(Journal of Hebei University of Technology),2011,40(1):41-45.
- [10] 陈灿坤,柳忠元,向建勇,等. 机械合金化制备碳化钛纳米粉体的合成机理研究[J]. 燕山大学学报(Journal of Yanshan University),2012,36(2):136-140.
- [11] 崔海亭,郭彦书,王振辉,等. 太阳能热动力发电系统中高温热管式吸热/蓄热器技术研究[J]. 河北工业科技(Hebei Journal of Industrial Science and Technology),2005,22(5):249-251.
- [12] 曹向茹,崔海亭,蒋静智. 泡沫金属相变材料凝固传热过程的数值分析[J]. 河北工业科技(Hebei Journal of Industrial Science and Technology),2011,28(1):1-4.

### (上接第 383 页)

### 参考文献:

- [1] WANG Hai-yan. Positive periodic solutions for functional differential equations[J]. J Differential Equations, 2004, 202(26):615-627.
- [2] CHU J, TORRES P J, ZHANG M. Periodic solutions of second order non-autonomous singular dynamical systems[J]. J Differential Equations, 2007, 239(1):196-212.
- [3] YU J, GUO E. Multiplicity results for periodic solutions to delay differential equations via critical point theory[J]. J Differential Equations, 2005, 218(1):15-35.
- [4] DONG Shi-jie, GE Wei-gao. Positive solutions for quasilinear second order differential equation[J]. Applicable Analysis, 2005,84(12):1 221-1 229.
- [5] 董士杰,周长杰. 带  $p$ -Laplacian 算子时滞微分方程多点边值问题的正解[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology),2010,31(5):385-389.
- [6] 索秀云,郭少聪,张继叶,等. 四阶非局部边值问题方程组正解的存在性[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology),2012,33(3):197-201.
- [7] 杨 飞,刘玉敏,郭彦平. 含有一阶导数的非局部四阶边值问题正解的存在性[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology),2012,33(4):283-289.
- [8] MA Ru-yun, MA Hui-li. Positive solutions of nonlinear discrete periodic boundary value problems[J]. Comput Math Appl, 2010,59(1):136-141.
- [9] ATICI F M, GUSEINOV G S. Positive periodic solutions for nonlinear difference equations with periodic coefficients[J]. J Math Anal Appl, 1999,232:166-182.
- [10] RABINOWITZ P H. Some global results for nonlinear eigenvalue problems[J]. J Funct Anal, 1971,7: 487-513.