

太阳能热发电用高温相变蓄热器的数值模拟

崔海亭, 孙坤坤, 李 宁

(河北科技大学机械工程学院, 河北石家庄 050018)

摘要:对采用单级相变材料(PCM)蓄热的太阳能热发电用高温相变蓄热器的蓄热过程进行了数值模拟。得到了采用单级蓄热时熔化过程中 PCM 温度和液相率随时间的变化曲线及不同时刻液相率的分布云图。通过对曲线和云图的分析,在保证蓄热量的前提下,提出了采用 3 种 PCM 级联蓄热的高温相变蓄热器的设计方案,并对其蓄热性能进行了模拟。结果表明,采用级联蓄热的方案减小了蓄热的总时间,且有效地降低了单级蓄热末期“死区”对蓄热性能的影响,使 PCM 的液相率分布更加均匀,为太阳能热发电用高温相变蓄热器的优化设计提供了理论依据。

关键词:太阳能;太阳能热发电;高温蓄热器;相变蓄热;数值模拟

中图分类号:TN91 **文献标志码:**A

Numerical simulation of high-temperature phase transition thermal energy storage container for solar thermal power generation applications

CUI Haiting, SUN Kunkun, LI Ning

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

Abstract: The heat storage process of the high temperature thermal energy storage container using single-stage PCM for solar thermal power generation is numerically simulated. The change curves of the PCM's temperature and liquid rate over time during the single-stage thermal stage melting process and its cloud distributions of the liquid rate at different time have been obtained. Through the analysis of the curves and cloud figures, in the premise of ensuring the heat accumulation amount, three kinds of PCM cascade regenerative high temperature thermal energy storage container design schemes are derived and simulated on their regenerative performance. The result indicates that the cascade heat storage schemes greatly reduce the total heat storage time and the "dead zones" effects effectively on the performance of heat storage during the single-stage regenerative terminal stage, which can make the PCM liquid rate distribution to be more uniform. It provides the theoretical basis for the optimization design of the high temperature phase change thermal energy storage container for solar thermal power generation applications.

Keywords: solar energy; solar thermal power generation; high temperature thermal energy storage container; heat storage of phase transition; numerical simulation

收稿日期:2014-08-19;修回日期:2014-10-16;责任编辑:李 穆

基金项目:河北省自然科学基金(E2014208005);河北省教育厅科学研究计划重点项目(ZH2012079)

作者简介:崔海亭(1964—),男,河北蠡县人,教授,博士,主要从事蓄热与强化传热技术方面的研究。

E-mail:cuiht@126.com

崔海亭,孙坤坤,李 宁.太阳能热发电用高温相变蓄热器的数值模拟[J].河北科技大学学报,2015,36(2):219-224.

CUI Haiting, SUN Kunkun, LI Ning. Numerical simulation of high-temperature phase transition thermal energy storage container for solar thermal power generation applications[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(2): 219-224.

太阳能热发电是利用聚光器将太阳辐射能聚集起来产生热量,并通过换热装置提供高温高压蒸汽,驱动热机发电,从而将太阳能转换为电能^[1]。但是由于太阳能是一种间歇性能源,既有昼夜之分,又受天气变化的影响,为了保证热发电系统稳定运行,太阳能热发电站通常采取蓄热措施,在傍晚和云遮时依靠储存的热量来发电^[2]。蓄热系统是太阳能热发电站中的重要组成部分,在电站运行时起着容量缓冲、稳定负荷和调节工况的作用^[3],其工作状况直接影响到太阳能热发电站的正常运行,因此建立蓄热系统的物理模型,并对其蓄放热特性进行研究,是提高太阳能热利用效率的必要前提^[4]。

目前国内外的专家学者对影响蓄热器蓄放热性能的蓄热材料以及蓄热器的结构进行了较多的研究^[5-9],但对蓄热器结构的研究主要集中在采用单级相变材料(phase change material, PCM)蓄热的前提下进行的蓄热体的外形设计及蓄热器整体结构的设计上^[10],对 PCM 在蓄热器内的熔化情况对蓄热性能的影响进行的研究较少。本文通过对高温相变蓄热器的蓄热过程进行模拟,探讨采用单级 PCM 时蓄热器的蓄热特性,总结 PCM 的液相率变化规律,提出了采用 3 种 PCM 级联蓄热的高温相变蓄热器的设计方案,并对其蓄热性能做了模拟,为高温相变蓄热器的优化设计提供了理论依据。

1 数值模拟

1.1 蓄热器结构及其简化

太阳能热发电用高温蓄热换热器主要由蓄热室箱体、高温相变蓄热管和相变蓄热材料组成,高温相变蓄热管采用陶瓷钢铁复合管,管内封装有相变蓄热材料,多根规格相同的高温相变蓄热管成正方形排布^[11]。

图 1 为单级蓄热时高温蓄热器的结构示意图,其中蓄热体的间距为 230 mm,左下侧为空气进口,右上侧为空气出口;图 2 为级联蓄热时蓄热体排布的示意图。蓄热室箱体长、宽、高分别为 1 500 mm,1 200 mm 和 700 mm。为了使出口位置的流体得以充分发展,空气的进出口管道采用长 100 mm,半径 60 mm 的圆管;蓄热体为 30 根高温相变蓄热管,内部填充铝硅合金系高温相变材料,其半径和高分别为 90 mm 和 600 mm。

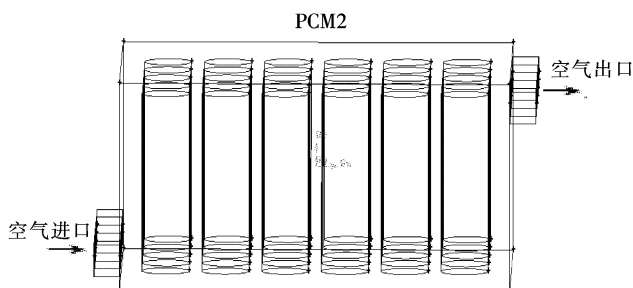


图 1 单级蓄热时高温蓄热器的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the high temperature energy storage container in single-stage heat storage

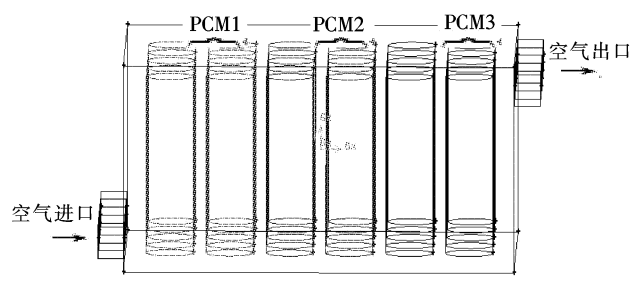


图 2 级联蓄热时蓄热体排布的示意图

Fig. 2 Diagram of the energy storage container configuration in cascade heat storage

为了方便利用 FLUENT 软件对蓄热器的蓄热过程进行数值模拟,对蓄热器的物理模型做如下假设^[12-13]:

- 1) 相变材料各向同性;
- 2) 相变材料的比热容、导热系数、密度为常数,不随温度发生改变;
- 3) 忽略蓄热器箱体外壁面的热量损失及蓄热体壁厚的影响;
- 4) 满足 Boussinesq 假设,只在浮升力项中考虑流体密度的变化;
- 5) 相变材料熔化后的流体为不可压缩牛顿流体;
- 6) 考虑自然对流的影响,自然对流为层流。

1.2 相变材料的选择

本文所选用的相变材料为 Al-Si 系高温相变材料,它具有热物性稳定,衰减慢,且在蓄放热过程中温度变化平稳、体积变化不大等优点,其物性参数如表 1 所示^[14]。其中单级蓄热时的蓄热材料是 PCM2,级联蓄热时采用 PCM1/PCM2/PCM3 级联蓄热。

表 1 Al-Si 合金系相变材料的物性参数

Tab. 1 Physical properties of Al-Si

种类	成分	相变温度/K	溶解热/ (kJ · kg ⁻¹)	密度/ (kg · m ⁻³)	比热/ (kJ · (kg · K) ⁻¹)	导热系数/ (W · (m · K) ⁻¹)
PCM1	Al-20Si	871.8	562.2	2 580	1 590	135.9
PCM2	Al-12Si	850	515	2 660	1 148	160
PCM3	Al-7Si	823.4	500	2 750	1 038	180

1.3 蓄热器的数值模拟

1.3.1 计算参数设置

利用 GAMBIT 软件建立蓄热器的几何模型,同时划分网格。将 GAMBIT 中输出的网格文件导入 FLUENT 软件中并检查网格,选择 3D 分离式非稳态求解器,选择 solidification/melting 模型模拟相变过程^[15]。在边界条件设置中,设置蓄放过程中空气进口速度为 10 m/s,求解时采用 SIMPLC 算法并进行全区域的初始化,初始温度设置为 300 K。为了得到 PCM 的温度和液相率随时间的变化规律,迭代前需要在适当的位置设置监视器,分别监视 PCM 区温度和液相率的变化情况。迭代时,时间步长的设置不能太大或太小,要保证在最大的迭代步数内能够稳定收敛^[16]。

1.3.2 蓄热器的数值模拟

采用 FLUENT 中的熔化/凝固模型对采用单级 PCM 蓄热的蓄热器进行了数值模拟。利用其蓄热体的温度曲线来分析蓄热过程中相变材料的温度变化情况,同时利用蓄热器中相变材料的液相率分布云图了解液相率分布情况。并在相同的操作环境下,对 3 种 PCM 级联蓄热的蓄热器进行了数值模拟,通过对比分析采用单级 PCM 蓄热和 3 种 PCM 级联蓄热对蓄热器蓄热性能的影响。

2 模拟结果及其分析

2.1 单级蓄热和级联蓄热下 PCM 的温度及液相率随时间的变化情况

图 3 为单级蓄热时 PCM 温度随时间的变化曲线,图 4 为级联蓄热时 PCM 的温度随时间的变化曲线。通过对比两图可以看出,两种情况下蓄热过程中 PCM 的温度变化趋势是基本保持一致,即蓄热开始时,相变区域升温非常迅速,在相对比较短的时间内温度迅速上升达到相变温度,这是因为在蓄热开始时,相变区域的温度低于 PCM 的相变温度,此时处于显热蓄热阶段,热空气与蓄热体温差较大,所以传热迅速,升温很快。此后由于 PCM 处于潜热蓄热阶段,所以相变区域的温度变化趋于平缓,维持在相变温度,但由于单级蓄热时靠近空气入口处的 PCM 先完成熔化过程,再次进入显热蓄热阶段,这就使单级蓄热 PCM 的整体温度更快地脱离了平稳发展;随着 PCM 的潜热吸热过程的完全结束,温度也随之开始快速升高,最后趋于平缓。

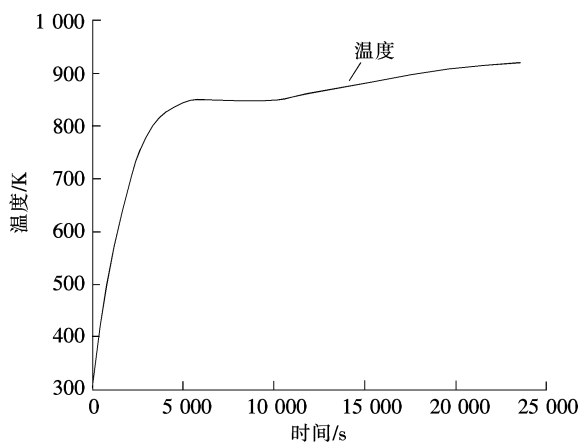


图 3 单级蓄热时 PCM 熔化时的温度曲线

Fig. 3 Temperature change of PCM area in melting process in single-stage heat storage

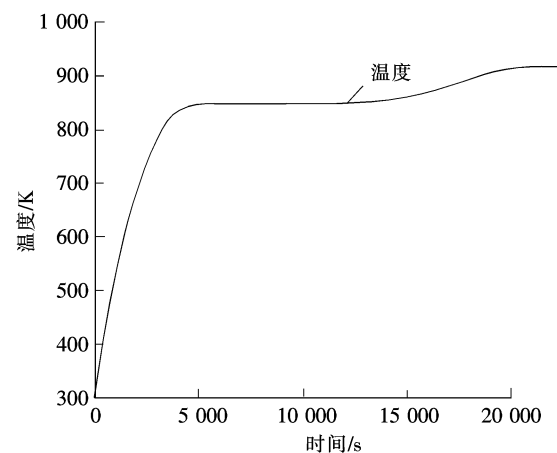


图 4 级联蓄热时 PCM 熔化时的温度曲线

Fig. 4 Temperature change of PCM area in melting process in cascade heat storage

图5为单级蓄热时PCM液相率随时间的变化曲线,图6为级联蓄热时PCM的液相率随时间的变化曲线。从两图中可以看出液相率基本上与时间成正比关系,但在熔化初始阶段单级蓄热时液相率产生于2400s,明显早于级联蓄热时的2820s,之所以会出现这一情况,是因为级联蓄热时靠近热空气进口所用PCM1的相变温度高于单级蓄热所用PCM2,使之需要更长的时间来吸收显热,以达到相变温度;随着熔化的进行,单级蓄热时的熔化速率有明显的先加快而后减慢的变化,这是因为蓄热体内热传导换热作用逐渐减弱,自然对流换热作用相应加强,加快了熔化速率,但是随着熔化程度越来越高,内外部温差也越来越小,传热速率随之变慢,而级联蓄热时由于PCM熔点的不同,使各蓄热体的熔化速率基本保持一致;在熔化过程快要结束时,即单级蓄热时液相率达到75%左右时的液相率曲线比级联蓄热时的液相率曲线变化更平缓,熔化速度相对较慢。这是由于相对级联蓄热的PCM3而言,单级蓄热的PCM2的传热温差的更小,导致传热过程存在的“死区”现象更严重,所以需要更长的时间来完成蓄热,随着蓄热过程的持续,级联蓄热于18200s时率先结束熔化过程,而单级蓄热则在21400s时完成熔化过程,因此采用级联蓄热的设计方案比单级蓄热时的熔化总时间提高14.95%。

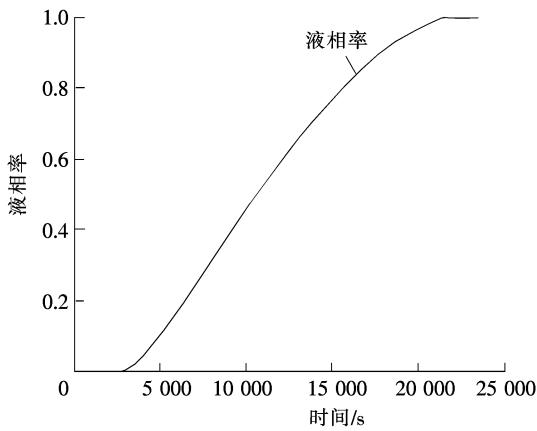


图5 单级蓄热时PCM熔化的液相率曲线

Fig. 5 Liquid fraction change of PCM area in melting process in single-stage heat storage

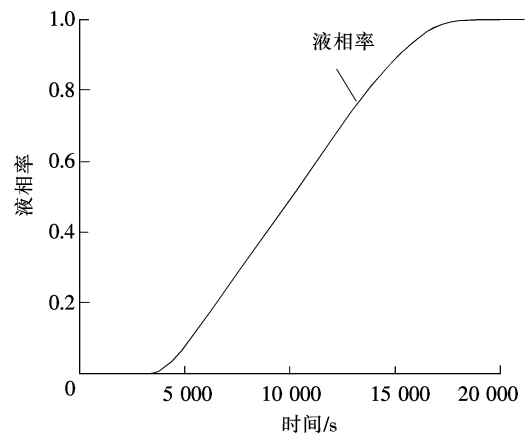


图6 级联蓄热时PCM熔化的液相率曲线

Fig. 6 Liquid fraction change of PCM area in melting process in cascade heat storage

2.2 单级蓄热和级联蓄热下蓄热体液相率的分布情况

图7为单级蓄热下PCM熔化30%时液相率的分布云图,图8为单级蓄热下PCM熔化80%时液相率的分布云图,图9为级联蓄热下PCM熔化30%时液相率的分布云图,图10为级联蓄热下PCM熔化80%

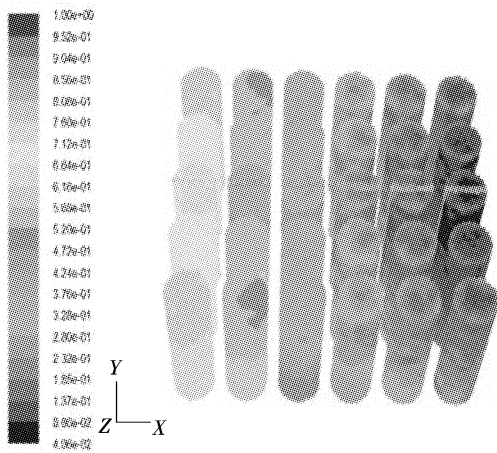


图7 单级蓄热下PCM熔化30%时液相率的分布云图

Fig. 7 Distribution nephogram of rate of liquid phase when the PCM melts for 30% in single-stage heat storage

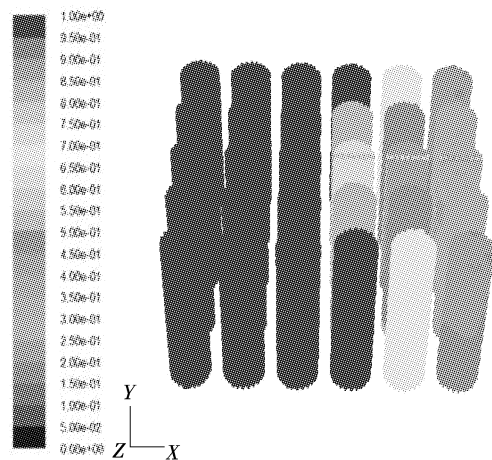


图8 单级蓄热下PCM熔化80%时液相率的分布云图

Fig. 8 Distribution nephogram of rate of liquid phase when the PCM melts for 80% in single-stage heat storage

时液相率的分布云图。从图 7 和图 8 可以看出单级蓄热时,熔化过程中液相率呈简单的层级分布,即靠近空气入口处的 PCM 先熔化,然后一层层的逐步熔化,而且随着熔化的进行,这种现象将越来越明显。这与传热流体的温度分布密切相关,因为热空气在近入口处的温度变化不大,这就使入口处 PCM 的熔化温差基本相同;但随着热空气的流动,热量的不断传导,使得热空气温度沿水平方向逐渐降低,这就让近入口处 PCM 的熔化速率快于沿水平方向排布的 PCM 的熔化速率,因此层级结构越来越明显;但是通过对相同液相率下,级联蓄热时 PCM 液相率分布云图的比较,可以看出相变材料采用级联蓄热时的蓄热器在熔化过程中液相率分布更均匀,并有效地改善了熔化过程中相变材料液相率的层级分布,降低了“死区”对蓄热器蓄热性能的影响。

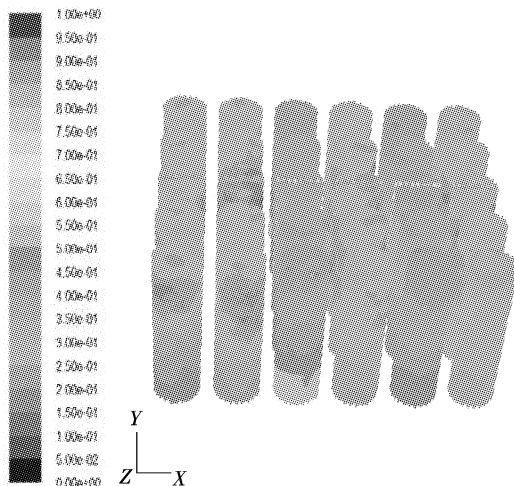


图 9 级联蓄热下 PCM 熔化 30% 时液相率的分布云图

Fig. 9 Distribution nephogram of rate of liquid phase when the PCM melts for 30% in cascade heat storage

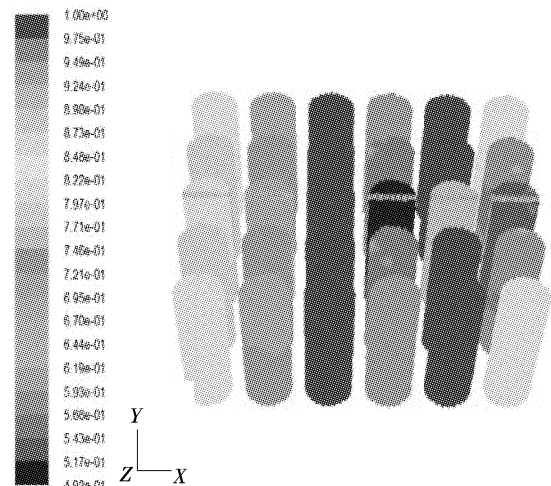


图 10 级联蓄热下 PCM 熔化 80% 时液相率的分布云图

Fig. 10 Distribution nephogram of rate of liquid phase when the PCM melts for 80% in cascade heat storage

3 结 语

本文介绍了运用 FLUENT 凝固/熔化模型求解相变问题的参数设置情况,并利用 FLUENT 软件对太阳能热发电用高温相变蓄热器的蓄热过程进行了数值模拟,得出相变材料总的熔化时间和温度及液相率随时间的变化规律,并通过相同液相率下单级蓄热和级联蓄热时的液相率分布云图,了解了熔化过程中液相率的分布情况,从而确定了太阳能热发电用高温相变蓄热器的优化方案,为该型蓄热器的优化设计及其应用提供了一定依据。

参考文献/References:

- [1] 王君一,徐任学. 太阳能利用技术[M]. 北京:金盾出版社,2008.
WANG Junyi, XU Renxue. Solar Energy Utilization Technology[M]. Beijing: Jindun Publishing House, 2008.
- [2] 吴玉庭,张丽娜,马重芳. 太阳能热发电高温蓄热技术[J]. 太阳能,2007(3):23-25.
WU Yuting, ZHANG Lina, MA Chongfang. High temperature heat storage technology in solar thermal power[J]. Solar Energy, 2007 (3): 23-25.
- [3] 左远志,李熙亚. 熔融盐斜温层混合蓄热单罐系统及其实验研究[J]. 化工进展,2007, 26(7):1018-1022.
ZUO Yuanzhi, LI Xiya. Scheme and experiments of a molten-salt hybrid thermocline thermal storage system[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2007, 26(7): 1018-1022.
- [4] 赵敏,赵豫红,周立芳. 太阳能热发电蓄热系统的混杂建模与仿真[J]. 计算机与应用化学,2012, 29(7):767-772.
ZHAO Min, ZHAO Yuhong, ZHOU Lifang. Hybrid modeling and simulation of heat storage system in solar thermal power plant[J]. Computers and Applied Chemistry, 2012, 29(7): 767-772.
- [5] 焦勇. Al-Si/Al₂O₃ 高温复合相变蓄热材料的制备与性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2012.

- JIAO Yong. Study on Preparation and Properties of Al-Si/Al₂O₃ High Temperature Phase Change Heat Storage Materials[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.
- [6] LANE G A. Solar Heat Storage: Latent Heat Material[M]. Florida: Technology CRC Press, 1986.
- [7] WANG Hua, HE Fang, DAI Yongnian, et al. Preparation and characterizations of a heat storage material combining porous metal with molten salt[J]. Proceedings of the International Conference on Power Engineering-03, November 9-13, 2003.
- [8] ASEBIYI G A. A second-law study on Packed bed energy storage systems utilizing phase change materials[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1992, 114: 93-99.
- [9] 王剑锋, 陈光明, 陈国邦, 等. 组合相变材料储热系统的储热速率研究[J]. 太阳能学报, 2000, 21(3): 258-264.
WANG Jianfeng, CHEN Guangming, CHEN Guobang, et al. The heat accumulation rate of the composite phase change materials thermal storage system [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2000, 21(3): 258-264.
- [10] 陈观生, 张仁元, 李风, 等. 水平放置圆柱型铝硅合金储热体数值模拟[J]. 太阳能学报, 2012, 33(12): 2093-2097.
CHEN Guansheng, ZHANG Renyuan, LI Feng, et al. The numerical simulation of the Cylindrical aluminum silicon alloy heat storage body at horizontal [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2012, 33(12): 2093-2097.
- [11] 崔海亭. 一种应用于太阳能热发电的高温储热换热装置[P]. 中国专利: CN201210336769.1, 2012-09-13.
CUI Haiting. A High Temperature Thermal Storage Heat Exchange Device Which is Applied in Solar Thermal Power Generation[P]. CN: CN201210336769.1, 2012-09-13.
- [12] VYSHAK N R, JILANI G. Numerical analysis of latent heat thermal energy storage system[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(7): 2161-2168.
- [13] 崔海亭, 张改, 蒋静智. 铝硅合金相变材料凝固/熔化过程的数值分析[J]. 河北科技大学学报, 2012, 33(5): 453-458.
CUI Haiting, ZHANG Gai, JIANG Jingzhi. Numerical simulation on melting and solidification process of aluminum-silicon alloy[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2012, 33(5): 453-458.
- [14] 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, 2006, 27(1): 36-40.
LIU Jing, WANG Xin, ZENG Daben, et al. The selectness of high-temperature phase change material Al-Si alloy and experimental research on the container[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2006, 27(1): 36-40.
- [15] 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.
HAN Zhanzhong, WANG Jing, LAN Xiaoping. The Engineering Examples and Applications of the FLUENT Fluid Simulation Calculation [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
- [16] 崔海亭, 孙坤坤, 蒋静智. 通信用蓄电池恒温柜蓄放热过程的数值模拟[J]. 河北科技大学学报, 2014, 35(1): 64-68.
CUI Haiting, SUN Kunkun, JIANG Jingzhi. Numerical simulation of the heat storage process about battery incubator in the communication base station[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2014, 35(1): 64-68.

2015 年 ICMIC 国际会议征稿启事

第七届国际建模、辨识与控制学术会议(ICMIC)将于2015年12月18—20日在突尼斯 Sousse 召开。ICMIC(International Conference on Modelling, Identification and Control)是控制理论、计算机科学与技术方面的著名国际学术会议,涉及系统建模、辨识、智能系统、软计算、计算机软件与理论等多个方向,具有国际前沿、跨学科等特点。

本会委托河北科技大学代为征集、审核、推荐论文。由河北科技大学推荐且被录用的论文将由 IEEE Xplore 出版收录,并在会后3—6个月被 EI Compendex 检索。优秀会议论文由作者扩充内容30%及以上,经河北科技大学组织专家审稿、润色与推荐,可在论文提交后12个月内发表于指定 EI 源刊(详情及投稿须知请登录 <http://xuebao.web.hebust.edu.cn/xxygg/59202.htm> 查询)。

本届大会将邀请多位国内外知名学者及业界人士到会做主题报告,并以分会场报告形式为与会代表提供交流良机,欢迎国内外学术同仁积极参加。现向国内学术界广泛征稿,欢迎赐稿。

(学报编辑部)