

太阳能季节性相变蓄热热泵系统在哈尔滨应用的模拟研究^{*}

哈尔滨工业大学 姜益强[☆]

香港理工大学 齐 琦

哈尔滨工业大学 姚 杨 马最良

摘要 介绍了该系统的原理、组成部分及运行模式。建立了系统数学模型。以 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 作为相变蓄热材料,以哈尔滨地区应用该系统的某别墅为例,对不同太阳能集热器面积和蓄热体积下的集热量、蓄热装置换热流体进出口温度、相变材料平均温度及蓄热装置散热损失进行了模拟与分析。结果表明,当太阳能集热器面积与蓄热体积匹配合适时,使用较小面积的太阳能集热器集得的热量就可满足建筑物的热负荷需求。

关键词 太阳能 季节性相变蓄热 热泵 集热器面积 蓄热体积

Simulation of a heat pump heating system based on seasonal solar energy storage by phase change material used in Harbin

By Jiang Yiqiang[★], Qi Qi, Yao Yang and Ma Zuiliang

Abstract Presents the principle, the components and the operation modes of the system. Develops a mathematic model of the system. Simulates and analyses the heat energy collected by the solar collector, the inlet and outlet temperatures of heat transfer fluid in the energy storage tank, the mean temperature of the phase change material(PCM) and the heat losses from the energy storage tank under different combinations of the collector area and the storage volume for the system with PCM of $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ applied to a villa in Harbin area. The results indicate that the energy collected by smaller solar collectors could be sufficient for the heat load of a building when the collector area and the storage volume are optimally matched.

Keywords solar energy, seasonal energy storage by phase change material, heat pump, collector area, storage volume

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

0 引言

太阳能是一种清洁能源,但它具有能量密度低、间歇性和不稳定性特点^[1],同时与热负荷需求存在时间差异,如在夏季,没有热负荷,而此时的

太阳辐射能最大;在冬季,热负荷大,而此时的太阳

①☆ 姜益强,男,1973 年 10 月生,博士,副教授
150090 哈尔滨工业大学二校区 2651 信箱
(0451) 86282123 (O) 13030089870
E-mail: jyq7245@sina.com

收稿日期:2006-08-08

一次修回:2006-11-14

二次修回:2007-01-10

^{*} 哈尔滨工业大学跨学科交叉基金资助项目(编号:HIT.MD2003.01),教育部留学归国基金资助项目

辐射能较小,同时室外温度也较低,太阳能集热器的集热效率低,因此此时的太阳辐射能不能满足建筑物的热负荷需求。为此,笔者所在研究组提出了太阳能季节性相变蓄热热泵系统,利用相变蓄热材料在夏季将太阳能贮存起来,冬季通过热泵系统将贮存在相变材料(phase change material, PCM)中的热量取出来供给室内,这样就能满足建筑物的热负荷需求。此系统不仅解决了利用显热蓄热时蓄热装置体积过大、蓄热效率低的问题,还解决了在冬季利用热泵直接供热效率过低的问题。1979—1992 年,全世界共有 30 个季节性蓄能集中太阳能热力站(central solar heating plants with seasonal storage, CSHPSS)建成^[1],其中德国建立了 8 个季节性蓄热示范工程^[2]。截至目前,美国、日本、韩国及欧洲的一些国家和地区都有季节性蓄能集中太阳能供热系统在运行^[3-5],但这些系统都是利用显热蓄热,不同于本文的季节性相变蓄热。

目前,相变蓄热技术在航天、化工、建筑等行业均有应用,蓄热单元通常有矩形式和壳管式两类。从国内外的研究情况来看,对平板形相变蓄热装置模型研究得较多^[6-8],而对壳管式相变蓄热装置研究得较少。1996 年 Mehmet Esen 等人对圆柱形蓄热装置进行了理论分析,并采用焓法对相变蓄热单元的瞬时过程作了分析^[9]。Uros Stritih 对利用肋片来提高传热性能的相变蓄热模型进行了研究^[10]。康艳兵等人建立了一种简便的相变蓄热同心套管传热模型^[11]。但对于适应于太阳能季节性相变蓄热的蓄能装置,还未见公开报道。

太阳能季节性相变蓄热热泵系统主要由太阳能集热器、蓄热装置、热泵机组、循环泵及各种控制阀门等构成。其中,蓄热装置、太阳能集热器和热泵机组是此系统的重要组成部分。系统原理图见图 1。

太阳能季节性相变蓄热热泵系统运行时间较长,在不同的时期处在不同的运行模式下,运行模式主要有 4 种:蓄热模式、释热模式、太阳能热泵供热模式和太阳能热泵蓄热-供热模式。

1 系统模型

由图 1 可知,该系统模型主要由太阳能集热器模型、蓄热装置模型、热泵机组模型等组成,本文只介绍太阳能集热器模型、蓄热装置模型,其他模型见文献^[12]。

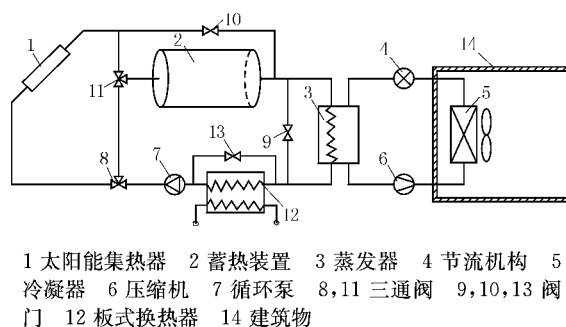


图 1 太阳能季节性相变蓄热热泵系统原理图

1.1 太阳能集热器模型

太阳能集热器的集热量 Q_A 采用下式计算:

$$Q_A = \eta A_c I_t = \dot{m}_c c_p (t_{t,o} - t_{t,i}) \quad (1)$$

式中 η 为集热器的效率,%; A_c 为集热器的采光面积(下文简称集热器面积), m^2 ; I_t 为投射到集热器上的总辐射照度, W/m^2 ; $\dot{m}_c$ 为集热器流体力工质的流量, kg/s ; c_p 为集热器流体力工质的比定压热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; $t_{t,o}$ 为集热器流体力工质的出口温度, $^\circ C$; $t_{t,i}$ 为集热器流体力工质的入口温度, $^\circ C$ 。

本文中采用的平板形集热器的效率为^[13]

$$\eta = 0.744 - \frac{4.45(t_{t,i} - t_a)}{I_t} \quad (2)$$

式中 0.744, 4.45 为拟合系数; t_a 为室外空气温度, $^\circ C$ 。

1.2 蓄热装置模型

本文采用的相变蓄热装置及其壳管式相变蓄热单元的结构如图 2 所示。如图 2a 所示,每个圆柱形外壳内由 7 组蓄热单元组成,蓄热单元为圆柱形壳管式套管,换热流体(heat transfer fluid, HTF)从管内流过,壳内为 PCM,流体通过管内时与 PCM 换热。季节性相变蓄热装置又由许多如

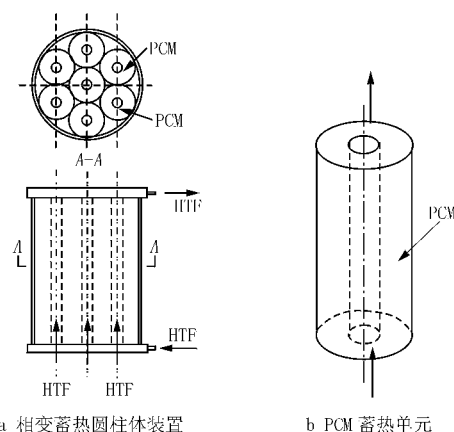


图 2 季节性相变蓄热装置和 PCM 蓄热单元示意图

图 2a 所示的圆柱体组成。

根据圆柱体的对称性特点,等半径圆周上温度场相同,因此圆柱形蓄热体的温度场分布可以看作是二维的,即沿径向(圆柱半径方向)和轴向(流体流动方向)。取环形的微元体如图 3 所示,根据焓法模型的微分方程^[14],可建立 PCM 微元体能量控制方程:

$$\rho V_{i,j} \frac{\partial h}{\partial \tau} \Big|_{i,j} = -\lambda A_{i-1} \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{i-1} + \lambda A_i \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_i - \lambda A_{j-1} \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{j-1} + \lambda A_j \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_j \quad (3)$$

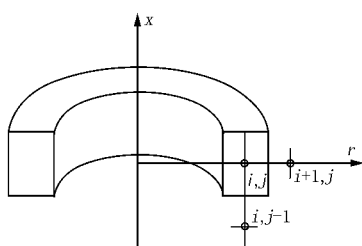


图 3 PCM 蓄热单元微元体

式中 ρ 为相变材料的密度, kg/m^3 ; $V_{i,j}$ 为微元体体积, m^3 ; i, j 为节点编号; h 为相变材料的比焓, J/kg ; τ 为时间, s ; λ 为相变材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; t 为相变材料各节点的温度, $^\circ\text{C}$; $A_i, A_{i-1}, A_j, A_{j-1}$ 分别为微元体外表面、内表面、上表面、下表面的面积, m^2 。

温度与比焓的关系式为

$$t = \begin{cases} \frac{h}{c_s} & h \leq c_s t_m \\ t_m & c_s t_m < h \leq c_s t_m + H_m \\ \frac{h - H_m}{c_l} & h > c_s t_m + H_m \end{cases} \quad (4)$$

式中 c_s 为相变材料的固相比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; t_m 为相变材料的相变温度, $^\circ\text{C}$; H_m 为相变材料的相变潜热, J/kg ; c_l 为相变材料的液相比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

边界条件如下:

内表面对流换热

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \alpha(t_f - t \Big|_{r=R_1}) \quad (5)$$

式中 α 为内表面表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; R_1 为环形柱体的内半径, mm ; t_f 为换热流体的温度, $^\circ\text{C}$ 。

外表面绝热

$$\frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = 0 \quad (6)$$

式中 R_2 为环形柱体的外半径, mm 。

上表面绝热

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad (7)$$

式中 L 为环形柱体的长度, m 。

下表面绝热

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (8)$$

初始条件如下:

相变材料初始温度

$$t_{\text{PCM}} \Big|_{\tau=0} = t_0 \quad (9)$$

1.3 模型的验证

为了验证该模型的准确性,将圆柱形壳管式相变蓄热装置中在不同相变材料体积下材料全部熔化所需时间的模拟结果与文献[15]中的模拟结果进行了对比。结果表明,在壳管半径为 20 mm,蓄热单元长度为 3.2 m,蓄热装置体积为 4.25 m^3 ,内表面积为 13 m^2 ,流体入口温度为 50 $^\circ\text{C}$,流体质量流量为 0.34 kg/s ,相变材料为 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,初始温度为 18 $^\circ\text{C}$ 的情况下,二者变化趋势基本吻合,最大误差在 10% 以内,如图 4 所示。这在一定程度上验证了该蓄热单元模型的准确性。

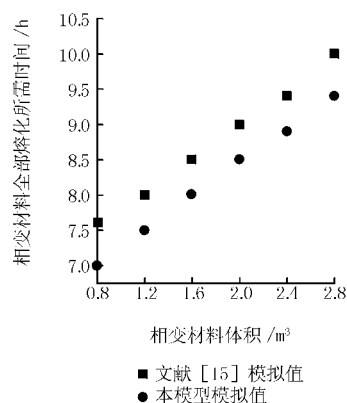


图 4 本文模型模拟结果与文献[15]模拟结果的比较

2 哈尔滨地区模拟结果分析

基于以上模型,下面对哈尔滨地区应用太阳能季节性相变蓄热热泵系统的某别墅建筑进行分析^[12]。该建筑物长 13.2 m,宽 9.6 m,共两层,总建筑面积为 324.93 m^2 。墙体采用保温墙体,墙体、屋顶、窗户的传热系数分别为 0.85, 0.92, 2.24 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。蓄热装置长 15 m,宽 10 m,高 6 m,

共由 2 520 组蓄热单元组成,蓄热单元的内径为 5 mm,外径为 155 mm。蓄热装置埋于地下 2 m 处,上有一层 100 mm 厚玻璃棉,可算得平均传热系数为 $0.28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,所用气象参数来自 DeST 软件数据库。

太阳能集热器的面积为 100 m^2 。假定从哈尔滨的供热期末 4 月 16 日以后太阳能集热器开始集热,将太阳能贮存起来,随着太阳辐射的增强,太阳能集热器集热量也逐渐增大,各月份的集热量如图 5 所示。当系统运行到 2 月份时,系统内贮存的热量已全部用完。由于太阳能的不确定性,为使系统控制简单,此时由辅助热源进行供热,太阳能集热系统停止运行,3 月份的集热量为零。系统全年总的集热量为 $19.7 \times 10^{10} \text{ J}$ 。

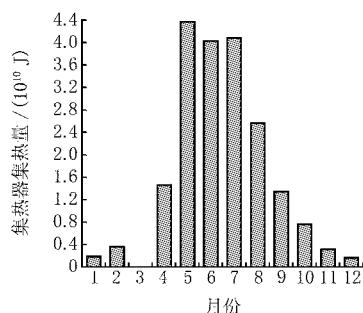


图 5 $A_c=100 \text{ m}^2$ 时太阳能集热器集热量

图 6 所示为蓄热装置的散热损失。开始阶段,随着蓄热的进行,相变材料的平均温度逐渐升高,但室外温度也在升高,因此 6,7 月份的热损失比 5 月份少;随后相变材料的平均温度在升高,但室外温度在逐渐降低,散热损失在逐渐增加,10 月份时达到最大,为 $5.6 \times 10^9 \text{ J}$ 。全年总的散热损失为 $3.5 \times 10^{10} \text{ J}$,约为总集热量的 17.8%。

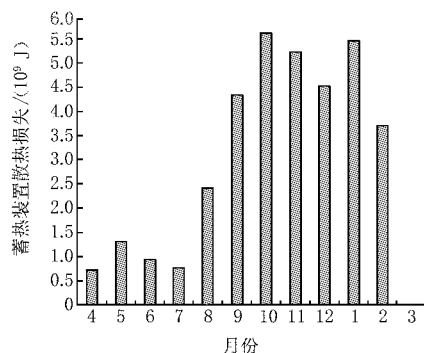


图 6 蓄热装置散热损失

图 7 所示为 4 月 17 日蓄热装置中换热流体的进出口温度及相变材料的平均温度。开始时换热

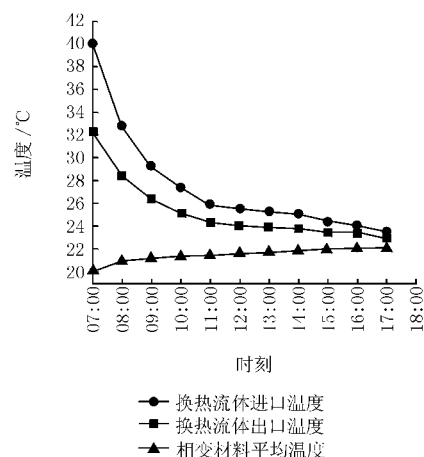


图 7 4 月 17 日蓄热装置中换热流体进出口温度及相变材料的平均温度

流体的进口温度为 40°C ,较相变材料温度高,换热流体与相变材料间的换热量较大,流体的出口温度较低。由于此时太阳辐射照度低,集热器集得的热量少,因此集热器中的流体升温小,表现在下一时刻时换热流体的进口温度较低。可以看出,蓄热过程相变材料的温度在逐渐升高。17:00 之后,太阳能集热器停止运行,系统处于停止状态。

图 8 所示为 5 月 17 日蓄热装置中换热流体的进出口温度及相变材料的平均温度。随着太阳辐

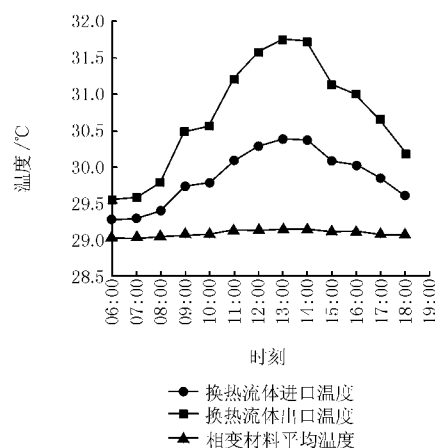


图 8 5 月 17 日蓄热装置中换热流体进出口温度及相变材料的平均温度

射照度逐渐增强,集热器的集热量越来越大,因此换热流体的进口温度呈升高趋势,但集得的热量并没能及时全部传给相变材料,所以换热流体的出口温度也在逐渐升高。但可以看出在各时间段内换热流体温度上升的幅度不一致,这主要是由于太阳辐射照度不稳定造成的。

图 9 所示为太阳能集热器面积分别为 70,80,

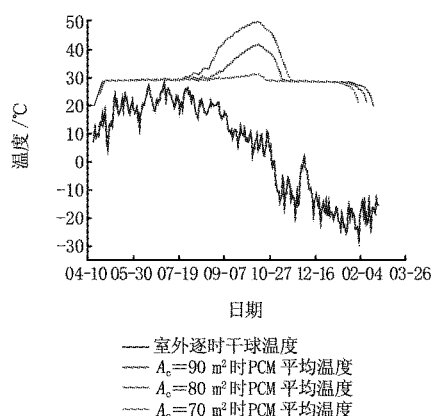
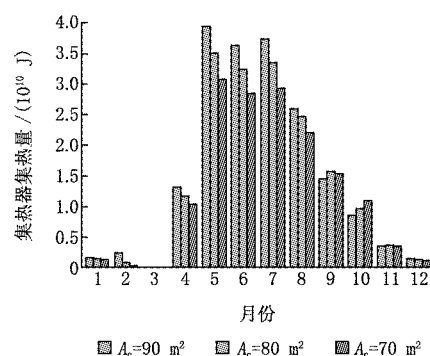


图9 相变材料全年平均温度

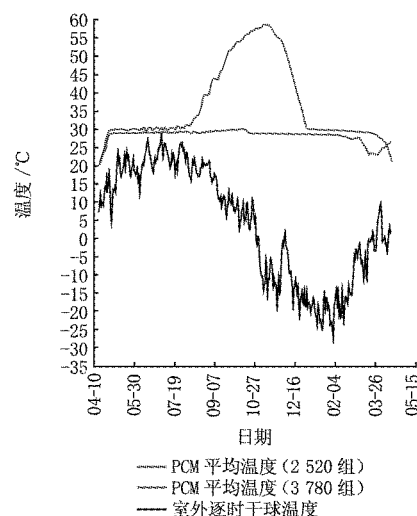
90 m² 时相变材料全年平均温度。从图中可以看出,相变材料在开始阶段是显热蓄热,温度升高快,此后的平均温度升高慢,基本在相变熔点左右。如对于集热器面积为 90 m² 的情况,到 7 月 26 日后,相变材料的平均温度开始快速上升,此时潜热蓄热结束,进入液相显热蓄热阶段。到 10 月 15 日相变材料平均温度达到最高值 50 °C 左右。随后进入供热期,开始时液相显热释热,相变材料平均温度下降较快,曲线的斜率较大,释热过程比蓄热过程快。然后进入潜热释热阶段和显热释热阶段,潜热释热阶段相变材料温度变化慢,持续时间长;显热释热阶段相变材料温度变化快,持续时间短。最后大约在 2 月 20 日系统停止运行。从图 9 还可以看出,集热器面积为 70 m² 时相变材料平均温度的变化比较平缓;而集热器面积为 80 m² 和 90 m² 时相变材料平均温度都有一个波峰,这是由于太阳能集热器集热量较大,潜热蓄热结束后进入液相显热蓄热,所以温度急剧上升,到供热期后逐渐下降;但集热器面积为 80, 90 m² 时的供热时间并不比 70 m² 时长很多,这是由于当相变材料的平均温度高时,换热流体的温度也高,因此太阳能集热器效率较低,实际集得的热量并不多。太阳能集热器面积为 70, 80 m² 时,系统停止供热的日期分别为 2 月 3 日和 2 月 12 日。

图 10 所示为太阳能集热器面积分别为 70, 80, 90 m² 时全年各个月份的集热量。从图中可以看出,4 月份到 8 月份,太阳能集热器的集热量随着集热器面积的增大而增大,这是比较容易理解的;但在 9 月份和 10 月份,集热器面积为 90 m² 时的集热量却比 70, 80 m² 还要少,这主要是因为集

图 10 太阳能集热器面积分别为 70, 80, 90 m² 时的集热量

热后期,当集热器面积较大时,系统内换热流体的温度较高,从而导致其集热器效率下降,这也说明了对于太阳能季节性相变蓄能热泵供暖系统,并不是太阳能集热器面积越大越好。

图 11 所示为集热器面积为 100 m², 蓄热装置中蓄热单元分别为 2 520 组和 3 780 组时,相变材料的全年平均温度。从图中可以看出,当蓄热单元

图 11 集热器面积为 100 m²、蓄热装置蓄热单元为 2 520 组和 3 780 组时相变材料的全年平均温度

数为 2 520 时,7 月 20 日后,相变材料的平均温度开始快速上升,进入液相显热蓄热阶段,到 10 月 15 日相变材料平均温度达到最高值 56.3 °C;而当蓄热单元数为 3 780,蓄热体积增大时,整个蓄热过程基本为相变蓄热,没有出现液相显热蓄热温度显著变化的阶段,相变材料平均温度的最高值仅为 30 °C 左右,通过蓄热装置的换热流体的温度也较低,太阳能集热器效率较高,可集得更多的热量。因此,当蓄热体积增大时,采用同样的集热器面积,

所集得的热量就能够满足全年热负荷的需求。

3 结论

3.1 蓄热装置是太阳能季节性相变蓄热热泵系统的重要组成部分,相变材料的蓄、放热过程有三个阶段:固相显热蓄、放热阶段,该阶段温度变化快,持续时间短;相变潜热蓄、放热阶段,该阶段相变材料温度变化慢,持续时间长;液相显热蓄、放热阶段,该阶段温度变化快,持续时间短。

3.2 当集热器面积一定时,若蓄热体积过小,则相变材料的平均温度就较高,集热器的集热效率低,蓄热量少,可能不能满足建筑物的热负荷要求,因此要尽可能使集热器面积与蓄热体积相匹配,使得相变材料的平均温度不会过高,从而可以减少蓄热装置的散热损失。

3.3 在相变蓄能装置大小合适的情况下,太阳能集热器面积为 100 m^2 时可以满足文中所述哈尔滨地区总建筑面积为 324.93 m^2 的别墅的全年供暖要求。但对不同地区的相同建筑物而言,其所需的太阳能集热器面积会有所变化。

参考文献

- [1] Breger D S, Bankston C A. Central solar heating plants with seasonal tank [J]. ASHRAE J, 1992, 34 (5): 27-33
- [2] Schmidt T, Mangold D, Muller-Steinhagen H. Central solar heating plant with seasonal storage in Germany [J]. Solar Energy, 2004, 76(1/3): 165-174
- [3] Hahne E, Hornberger M. Experience with a solar heating ATEs system for a university building [J]. ASME J Solar Energy Eng, 1994, 116: 88-93
- [4] Lindenberger D, Bruckner T. Optimization of solar district heating systems: seasonal storage, heat pumps, and cogeneration [J]. Energy, 2000, 25(7): 591-608
- [5] Hideki T, Takashi T, Masaya O. Feasibility study of a district energy system with seasonal water thermal storage [J]. Solar Energy, 2000, 69(6): 535-547
- [6] Vakilaltojjar S M, Saman W. Analysis and modeling of a phase change storage system for air conditioning applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(3): 249-263
- [7] Giovanni C, Stefano P. Experimental and numerical investigation of the steady periodic solid-liquid phase-change heat transfer [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(20): 4181-4190
- [8] Abel H G, Salvador M A, Eduardo C R, et al. Modeling of the charge and discharge processes in energy storage cells [J]. Energy Conversion & Management, 1999, 40(15/16): 1753-1763
- [9] Mehmet Esen, Teoman Ayhan. Development of a model compatible with solar assisted cylindrical energy storage tank and variation of stored energy with time for different phase change materials [J]. Energy Conversion & Management, 1996, 37(12): 1755-1785
- [10] Uros Stritih. Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage system for buildings [J]. Energy and Buildings, 2003, 35(11): 1097-1104
- [11] 康艳兵, 张寅平, 朱颖心, 等. 相变蓄热同心套管传热模型和性能分析 [J]. 太阳能学报, 1999, 20(1): 20-25
- [12] 齐琦. 太阳能季节性相变蓄热热泵供暖系统的模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005
- [13] 李申生. 太阳能的特点 [J]. 太阳能, 2003(5): 10-12
- [14] 郭宽良, 孔祥谦, 陈善年. 计算传热学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1998: 59-60
- [15] Mehmet Esen, Aydin Durmus, Ayla Durmus. Geometric design of solar-aided latent heat store depending on various parameters and phase change materials [J]. Solar Energy, 1998, 62(1): 19-28

• 会讯 •

首届中国新能源国际高峰论坛

2007 年 1 月 13 日首届中国新能源国际高峰论坛在北京钓鱼台国宾馆举行。论坛由中华全国工商业联合会新能源商会主办。全国政协副主席、全国工商联主席黄孟复出席开幕式并作重要讲话。开幕式上还举行了《中国新能源产业年度报告(2006)》的发布仪式。与会人员就新能源产业发展、可再生能源技术与市场、CDM 在清洁能源技术开发中的角色、清洁能源与节能等议题进行了交流, 200 余人参加了论坛。

(本刊特约通讯员 吴延鹏)