

文章编号: 1000-8055(2010)01-0047-06

容器热物性参数对蓄热系统性能影响的数值研究

吴 斌, 邢玉明, 芮守祯

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 建立了分析潜热蓄热系统蓄热性能的二维数学模型, 并进行了数值计算. 其中考虑了容器壁面的导热, 且相变传热只考虑导热模型, 对相变材料 (PCM) 相变过程的求解采用解耦法计算模型. 对几种不同材料容器内 PCM 熔化过程进行了数值计算比较, 结果表明, 容器材料的导热系数、比热容和密度等热物性参数对 PCM 的熔化有很大的影响. 此外还对不同初始温度和边界壁温对 PCM 熔化的影响进行了数值计算. 所得结论对潜热蓄热系统的热性能及其优化设计有一定的指导作用.

关 键 词: 潜热蓄热; 相变材料; 解耦法; 热物性参数; 熔化

中图分类号: TK512+.4

文献标识码: A

Numerical investigation of the effect of thermo physical properties on the performance of heat storage system

WU Bin, XING Yu-ming, RU Shou-zhen

(School of Aeronautic Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Two-dimensional mathematical model of latent heat storage performance was presented for heat storage system in consideration of the conduction of container wall, and only the process of phase change heat transfer was considered by conduction. The decoupled method computational model was used to analyze the phase change process of phase change material (PCM). Numerical calculation and comparison of the melting process of PCM were conducted for various types of container materials. The results show that thermo physical properties of thermal conductivity, specific heat and density of the container material have very important effects on the melting of PCM. Furthermore, numerical calculation and comparison of the melting process of PCM were conducted for different values of initial temperature and boundary wall temperature. The conclusion provides guidelines for latent heat storage system thermal performance and design optimization.

Key words: latent heat storage; phase change material; decoupled method; thermo physical properties; melting

利用相变材料 (PCM) 的相变潜热实现能量的储存和利用, 有助于提高能效和开发可再生能源, 是近年来能源科学和材料科学领域中一个十

分活跃的前沿研究方向. 与显热储能相比, 相变储能具有储能密度高, 体积小巧, 温度控制恒定, 节能效果显著, 相变温度选择范围宽, 易于控制等优

收稿日期: 2008-12-14; **修订日期:** 2009-04-26

基金项目: 国家自然科学基金 (50876004)

作者简介: 吴斌 (1983 -), 男, 江西永丰人, 博士生, 主要研究太阳能热动力发电和固-液相变蓄热及其强化等.

点,在航天器热控制、空间站热动力发电系统、工业废热和余热回收、电力的“移峰填谷”、将间断能源如太阳能、风能等转化为连续能源方面以及工业与民用建筑和空调节能等众多领域具有重要的应用价值和广泛的应用前景,已成为世界范围内的研究热点^[1]。

潜热蓄热系统主要由 PCM、封装容器和换热器组成。国内外对潜热蓄热系统的研究主要致力于 PCM 材料研究、传热机理、PCM 强化传热手段和数值求解方法上^[2-3],虽然也会考虑封装容器的影响,但极少对容器材料的导热系数、密度和比热容等热物性参数对封装容器内 PCM 相变传热过程的影响做过具体的研究,仅文献[4]中基于焓法模型对几种材料容器内 PCM 的熔化过程进行了对比研究。对本文以文献[5]中的电加热蓄热系统为研究对象,在 Zivkovic 和 Fujji^[6]提出的一维修正焓法基础上将其应用扩展至求解二维等温相变问题的解耦法,对考虑容器壁面的二维蓄热系统建立数学模型进行计算分析,以得出容器材料热物性参数对容器内 PCM 熔化过程的影响。

1 数学模型

电热余热储存利用是潜热蓄热技术的一个重要应用领域,利用电加热蓄热系统可将用电低谷时的电转化为热储存起来,在用电高峰时再把这部分热释放出来利用。本文以文献[5]中的电加热潜热蓄热系统为研究对象,该系统如图1所示,由7个填充 PCM 的铝长方体容器组成,每一容器内尺寸为 $6.0\text{ cm} \times 6.0\text{ cm} \times 25.4\text{ cm}$,容器壁厚为 2 mm 。容器的一侧为电加热壁,蓄热时电加热壁对容器进行定温加热。容器另一侧为铝制排管,当蓄热系统需要释热时,内通流体,此时,储存在 PCM 内的热量将传递给流体。整个系统置于隔热

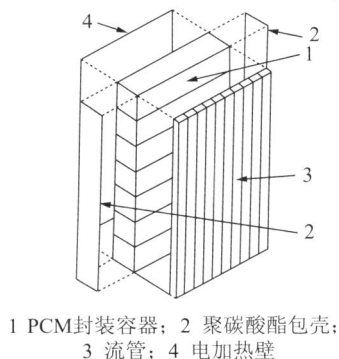


图1 潜热蓄热系统

Fig.1 Latent heat storage system

箱中与外界隔绝。出于系统使用要求主要是加热流体温度范围的考虑,在此选十八烷作为 PCM 工质,其熔点固定。

对上述蓄热系统的蓄热过程建立如图2所示的二维模型,为简化分析作了以下几项假定:
①PCM和容器热物性参数与温度无关;②PCM初态为固态;③PCM是均质的且各向同性;④PCM熔点固定(等温相变);⑤忽略PCM熔化阶段自然对流的影响,且传热仅考虑导热模型;⑥忽略PCM封装容器之间的传热。

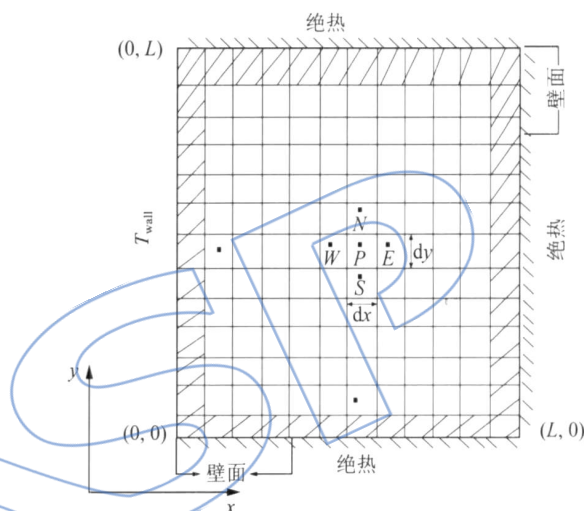


图2 二维蓄热系统

Fig.2 Two-dimensional heat storage system

基于上述假设,焓法模型的能量控制方程为

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \text{div} \left[\frac{\kappa}{\rho} \text{grad } T \right] - L \frac{\partial f_l}{\partial t} \quad (1)$$

其中

$$h = \int_m c dT \quad (2)$$

$$f_l(T) = \begin{cases} 1 & \text{当 } T > T_m \\ 0 & \text{当 } T < T_m \end{cases} \quad (3)$$

式中 h 为显热; t 为时间; κ 为 PCM 导热系数; ρ 为 PCM 密度; T 为 PCM 温度; L 为相变潜热; f_l 为局部液相分数; T_m 为 PCM 熔化温度; c 为 PCM 比热容。

边界条件

在 $x = 0$ 的壁面上

$$T_i(0, t) = T_{\text{wall}} \quad (4a)$$

其余三个壁面即 $x = L, y = 0, y = L$ 上都为绝热,则有

$$\partial T_i / \partial x |_{x=L} = 0 \quad (4b)$$

$$\partial T_f / \partial x |_{y=0} = 0 \quad (4c)$$

$$\partial T_f / \partial y |_{y=L} = 0 \quad (4d)$$

式中 T_f 为容器温度; T_{wall} 为外壁面温度; x, y 分别为横向和纵向坐标; L 为容器长度。

2 算 法

对于二维容器 PCM 能量控制方程为

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\kappa}{\rho} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\kappa}{\rho} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - L \frac{\partial f_1}{\partial t} \quad (5)$$

熔化过程中,非相变控制体“i”内 PCM 为纯固态或纯液态,则由式(2)和(3)可得

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\kappa}{\rho} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\kappa}{\rho} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (6)$$

式中 c 为固态或液态比热容,其值取决于控制体的相态。

将式(6)离散并整理后可得

$$a_E \cdot T_E + a_W \cdot T_W + a_P \cdot T_P + a_N T_N + a_S T_S = b \quad (7)$$

式中 $a_W = a_E = -Fo$; $a_S = a_N = -Fo$; $a_P = 1 + 4 \times Fo$; $b = T_P^{old}$; 上标 old 表示前一个时间步长; Fo 为有限差分形式 Fourier 数: $Fo = \alpha \Delta t / \Delta x^2$ 或 $\alpha \Delta t / \Delta y^2$; $\alpha = \kappa / (\rho \cdot c)$ 为 PCM 热扩散系数。

当控制体“i”熔化(或凝固)时,液相分数 f_{li} 在 (0,1) 内取得,对于等温相变有 $T_P \equiv T_m$,则式(5)变为

$$L \frac{\partial f_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\kappa}{\rho} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\kappa}{\rho} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (8)$$

将式(8)离散后整理可得

$$f_{1P} = f_{1P}^{old} + \frac{\kappa \Delta t}{\rho \Delta x^2} (T_W - 2T_m + T_E) + \frac{\kappa \Delta t}{\rho \Delta y^2} (T_S - 2T_m + T_N) \quad (9)$$

式(9)即为相变控制体内液相分数更新式,由此式可以看出,液相分数由温度场计算得到而与焓无关。相变时,PCM 温度场由式(7)计算,此时控制方程中 $a_W = a_E = 0$, $a_S = a_N = 0$, $a_P = 1$, $b = T_m$,即温度场与液相分数解耦。此外,从式(9)可见:对于等温相变,相变时提供给相变控制体的所有热量都用于改变控制体内的潜热量。

2.1 熔化开始

在假定的时间步,如果 $T_P \geq T_m$ 而 $T_P^{old} < T_m$,则表示在这一时间步控制体内 PCM 开始熔化。

此时需对式(9)进行修正

$$f_{1P} = f_{1P}^{old} + \frac{\kappa \Delta t}{\rho \Delta x^2} (T_W - 2T_m + T_E) + \frac{\kappa \Delta t}{\rho \Delta y^2} (T_S - 2T_m + T_N) - \frac{c}{L} (T_m - T_P^{old}) \quad (10)$$

式(10)中最后一项表示部分潜热用于将上一时间控制体的温度提高至相变温度 T_m ,该部分热量不能用于熔化 PCM。

2.2 熔化结束

在假定的时间步,如果 $f_{1P} \geq 1$ 而 $f_{1P}^{old} < 1$,则表明在这一时间步控制体内 PCM 完全熔化, $a_W = a_E = 0$, $a_S = a_N = 0$, $a_P = 1$, $b = T_m$,此时需对该控制体的离散方程(7)中的系数 b 进行修正

$$b = T_m - \frac{L}{c} (1 - f_{1P}^{old}) \quad (11)$$

式中右边最后一项表示完全熔化控制体内 PCM 所需的热量,该部分热量不能用于升高 PCM 的温度。

3 结果与分析

本文对图 2 所示的蓄热系统建立了数学模型,为与文献[4]计算结果进行对比以验证计算结果的正确性,在此参照文献[4]也将二维模型划分为 32×32 个 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 网格,其中 PCM 占 30×30 个网格。PCM 为十八烷,其热物性参数如表 1^[5] 所列,容器材料类别及热物性参数如表 2 所列。PCM 初始温度设为低于其熔点温度 5°C ,外壁面温度设为高于 PCM 熔点温度 15°C 。

表 1 十八烷的热物性参数

Table 1 Thermophysical properties of n-octadecane

参数	固态	液态
熔点/ $^\circ\text{C}$	27.7	
潜热/ $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	243.5	
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	777	
比热容/ $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	2.153	2.205
导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.148	0.358

一般采用 PCM 的熔化率 f (即容器内 PCM 熔化质量与总 PCM 质量之比) 作为衡量 PCM 熔化速度和熔化程度的主要指标,故在本文中将熔化率作为参考进行研究分析。采用本文介绍的解耦法对表 2 所列的几种材料容器内 PCM 的熔化过程进行计算,所得 PCM 熔化率结果见表 2,

并将结果与文献[4]中采用焓法的结果进行对比,以验证其结果的准确性,通过对比可见两者吻合的很好,因此,本文的计算结果正确可靠.由表 2 可见,铜容器内 PCM 完全熔化时间为 209 min,而其它材料容器在相同的时间内,导热系数越小则容器内 PCM 熔化率越小,熔化越不完全.

表 2 不同容器材料下 PCM 的熔化率 f (209 min)
Table 2 Thermophysical properties of various container materials and melting fraction (209 min) of PCM

材料	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	f	$f^{[1]}$
玻璃	0.78	2700	840	0.34	0.34
不锈钢	7.7	8010	500	0.61	0.62
锡	64	7304	226	0.77	0.80
混合铝	137	2659	867	0.89	0.91
铝	204	2707	896	0.91	0.93
铜	386	8954	383	1.00	1.00

如图 3 所示为不同材料容器内 PCM 熔化率 f 随时间的变化.由图可见,考虑了容器材料的计算模型,其 PCM 熔化速度比未考虑容器材料的熔化速度更快,这是因为容器材料的导热系数比 PCM 大,靠近加热器一侧容器壁将热量以导热形式以更快的速度传递给其余壁面,相当于强化了其余几处壁面对容器内 PCM 的传热.容器壁对 PCM 熔化的影响在某种程度上可类比于加肋强化的效果,其存在强化了相变传热过程.但值得注意的是,从另一个角度考虑容器壁面的存在相当于增加了一个导热热阻,因此,当壁厚达到一定程度时,容器壁厚的增加非但不能强化容器内

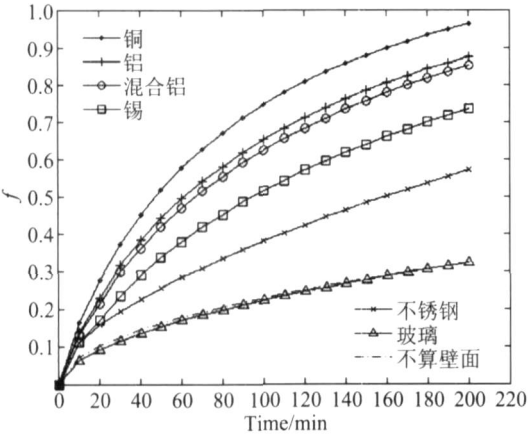


图 3 不同材料容器内 PCM 熔化率 f 随时间的变化
Fig. 3 Variation of melt fraction of PCM for various container materials

PCM 的传热相反还会起抑制作用.此外,还可看到,导热系数 κ 低于 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,不同材料容器内 PCM 熔化率的差别比高于 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 时更加突出.

为了分析容器材料热物性参数(导热系数 κ 、比热容 c_f 、密度 ρ)对 PCM 熔化过程的影响,在此以 Al 容器为例进行计算分析.图 4 所示为固定 c_f 和 ρ_f PCM 熔化率 f 随 κ 的变化,由图可见,熔化率随 κ 的增加而增大,且 κ 值较小时 ($10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),熔化率很小;熔化率随 κ 增加的增大幅度逐渐减小,且 κ 较大时,已十分接近.图 5 所示为固定 κ 和 ρ_f PCM 熔化率 f 随 c_f 的变化,由图可见,熔化率随 c_f 的增加而增大,且随着 c_f 的逐渐增加熔化率之间的差别越来越小. c_f 值较大时 ($1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) PCM 在 300 min 内已完全熔化,而此时较小值 c_f ($100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

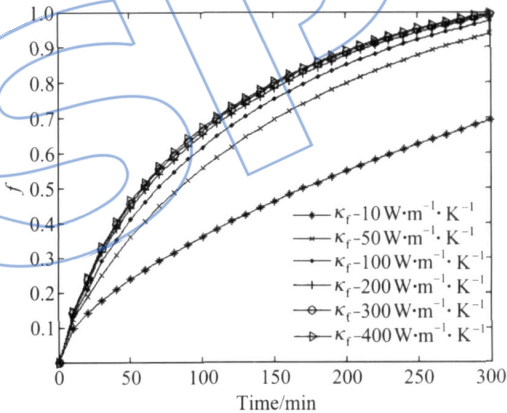


图 4 不同 κ_f 下 PCM 熔化率 f 随时间的变化
Fig. 4 Variation of melt fraction of PCM for different values of κ_f

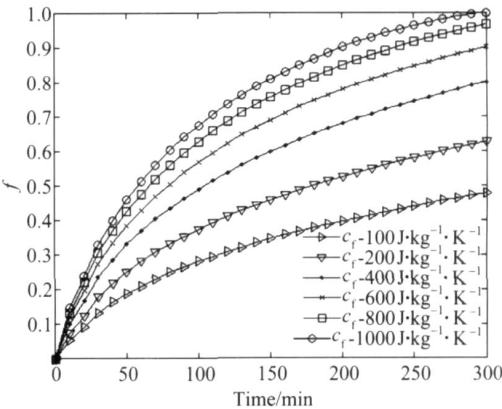


图 5 不同 c_f 下 PCM 熔化率 f 随时间的变化
Fig. 5 Variation of melt fraction of PCM for different values of c_f

PCM 仅完成了一半左右的熔化 ($f = 0.48$). 图 6 所示为固定 κ 和 α PCM 熔化率 f 随 ρ_f 的变化, 由图可见, 熔化率随 ρ_f 的增加而增大, 其增幅则逐渐减小, 到较大值时不同 ρ_f 时的熔化率之间差别已不太明显.

在此, 本文还对初始条件 T_{ini} 和边界条件(壁温) T_{wall} 对熔化过程的影响进行了数值计算. 表 3 所列为不同 T_{ini} ($T_m - T_{ini}$) 对不同材料容器内 PCM 熔化率的影响结果. 由表可见, 随着 T_{ini} 减小($(T_m - T_{ini})$ 增大) 熔化率减小程度很小几乎不变, 由此可知, 初始温度对于 PCM 熔化结果的影响很小. 同时, 从表中的计算结果我们还可看到, 不同容器材料内 PCM 的熔化程度存在明显的差距. 表 4 所列为不同外壁温 ($T_{wall} - T_m$) 对几种材料容器内 PCM 熔化率的影响结果. 由表可见, 外壁温越高熔化率越大, 完成熔化的时间也越短.

此外, 还可看到, 熔化率增大的幅度随壁温的增加而逐渐减小.

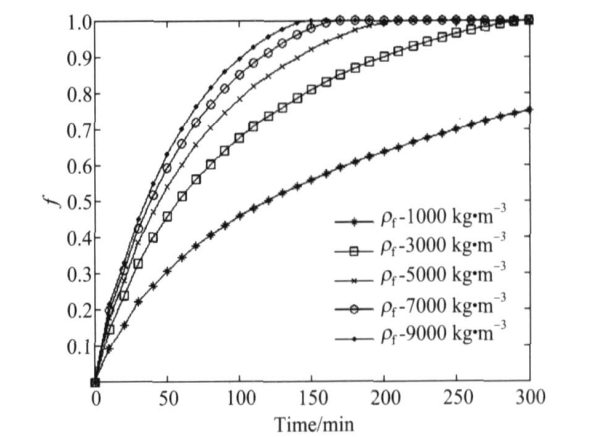


图 6 不同 ρ_f 下 PCM 熔化率 f 随时间的变化

Fig. 6 Variation of melt fraction of PCM for different values of ρ_f

表 3 不同材料容器内 PCM 熔化率 f 随 $(T_m - T_{ini})$ 的变化

Table 3 Variation of melt fraction of PCM for different values of $(T_m - T_{ini})$ with various container materials

$(T_m - T_{ini}) / ^\circ\text{C}$	玻璃		不锈钢		锡		混合铝		铝		铜	
	Time/ min	f	Time/ min	f	Time/ min	f	Time/ min	f	Time/ min	f	Time/ min	f
5	300	0. 41	300	0. 73	300	0. 87	300	0. 97	300	1. 00	236	1. 00
10	300	0. 40	300	0. 72	300	0. 87	300	0. 97	300	1. 00	239	1. 00
15	300	0. 40	300	0. 72	300	0. 87	300	0. 97	300	0. 99	242	1. 00

表 4 不同材料容器内 PCM 熔化率 f 随 $(T_{wall} - T_m)$ 的变化

Table 4 Variation of melt fraction of PCM for different values of $(T_{wall} - T_m)$ with various container materials

$(T_{wall} - T_m) / ^\circ\text{C}$	玻璃		不锈钢		锡		混合铝		铝		铜	
	Time/ min	f	Time/ min	f	Time/ min	f	Time/ min	f	Time/ min	f	Time/ min	f
5	300	0. 23	300	0. 41	300	0. 55	300	0. 67	300	0. 70	300	0. 81
10	300	0. 34	300	0. 60	300	0. 75	300	0. 87	300	0. 90	300	0. 99
15	300	0. 41	300	0. 73	300	0. 87	300	0. 97	300	0. 99	236	1. 00
20	300	0. 47	300	0. 83	300	0. 95	269	1. 00	251	1. 00	242	1. 00

4 结 论

本文基于解耦法对二维固液蓄热系统物理模型进行了数值模拟, 对容器材料热物性参数 (κ , α , ρ_f) 对 PCM 熔化的影响进行了研究和分析. 结果表明:

1) 容器材料热物性参数对容器内 PCM 的熔化有很大的影响作用, PCM 熔化速度随容器材料热物性参数的增加而增大, 但熔化速度增加的幅

度渐缓;

2) 初始温度对 PCM 熔化的影响作用很小, 而边界条件对 PCM 熔化有很大的影响;

3) 容器材料热物性参数值达到一定值时, 其值的增加对加快 PCM 熔化的作用并不明显.

因此, 在选择容器材料时应综合考虑其热物性参数的影响. 本文的研究工作为固液相变蓄热系统的设计和性能优化提供了有益的参考.

参考文献：

- [1] Blen Z, Jose M M, Lusia F C. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and application [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(2) : 251-283.
- [2] Sharma A, Tyagi V V, Chen C R, et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13 : 318-345.
- [3] 张寅平, 胡汉平, 孔祥东, 等. 相变贮能——理论和应用 [M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1996.
- [4] Sharma A, Sharma S D, Buddhi D, et al. Effect of thermo physical properties of heat exchanger material on the performance of latent heat storage system using an enthalpy method [J]. Int. J. of Energy Res., 2006, 30 : 191-201.
- [5] Costa M, Buddhi D, Oliva A. Numerical simulation of a latent heat thermal energy storage system with enhanced heat conduction [J]. Energy Convers. Mgmt., 1998, 39 : 319-330.
- [6] Zivkovic B, Fujji I. An analysis of isothermal phase change of phase change material within rectangular and cylindrical containers [J]. Solar Energy, 2001, 70(1) : 51-61.

JALSP