

具有自由表面的固-液相变的数值模拟与实验研究

夏 莉, 张 鹏, 王如竹

(上海交通大学 制冷与低温研究所, 上海 200240)

摘 要: 通过对相变现象的分析, 建立了 VOF (Volume of Fluid) 模型与焓-多孔介质模型的耦合计算模型, 利用该模型模拟出石蜡相变过程中的相互关联的多种物理现象, 其中包括固体石蜡中的导热、液体石蜡中的导热与自然对流、相界面移动以及相变材料在相变过程中的体积变化等。计算结果表明, 石蜡内部的自然对流在石蜡的融化过程中起到非常重要的作用。在自然对流的旺盛期, 石蜡的最大融化速率为每秒 0.002 005%; 同时, 融化过程对自然对流也有影响, 液体石蜡中的流速在融化 150 s 左右达到最大值 ($6.08 \times 10^{-3} \text{ m/s}$)。石蜡在整个融化过程中体积膨胀了近 10%。利用石蜡相变过程的可视化实验来验证数值模拟的准确性, 结果表明, 该数学模型可以较真实地、较完整地反映出石蜡相变过程中的各方面特征。

关 键 词: 相变; VOF 模型; 焓-多孔介质模型; 数值模拟

中图分类号: TK513.5 **文献标识码:** A

引 言

潜热储能系统中的相变换热过程具有强烈的非线性特征, 是一个包括了多种热物理现象的复杂过程。目前的研究方法中, 数值模拟已成为一种非常有效途径^[1~3], 但由于计算机运算速度及计算方法等因素的限制, 在数值模拟过程中通常只针对部分现象进行研究而忽略了其它现象, 然而这些现象往往是相互关联的。因此, 对一些现象的忽略会造成数值模拟结果与实际情况出现不同程度的偏差。例如, 在以前的研究中, 通常在相变材料内部的换热模型中只采用导热模型并且几乎所有模型都忽略相变材料的体积变化^[4~6]。本研究中, 采用焓-多孔介质模型来模拟石蜡中包括固相导热和液相对流的相变过程, 并用 VOF 模型模拟石蜡在融化过程的体积膨胀。

1 实验装置

图 1 为验证数值计算方法的实验装置。因考虑

到在石蜡中布置热电偶会对石蜡的融化过程产生影响, 所以这里采用可视化实验来测定石蜡融化过程中的固-液界面以及石蜡上表面与空气间的自由界面位置。图中上部由空气所占据的部分是为石蜡在融化过程的体积膨胀提供的空间 (一般来说石蜡等相变材料在发生相变时都会有较大的体积变化), 下部为石蜡融化前呈固态时的体积。

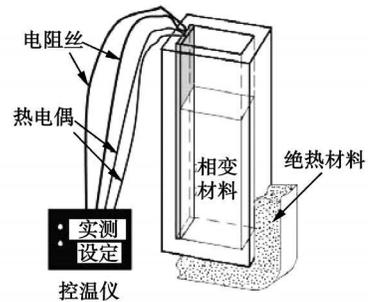


图 1 实验装置

2 物理模型

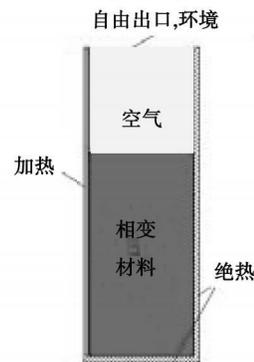


图 2 物理模型

收稿日期: 2009-09-14 修订日期: 2009-09-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50876058); 上海市教育委员会科研创新基金资助项目 (08ZZ99)

作者简介: 夏 莉 (1978-), 女, 辽宁沈阳人, 上海交通大学博士研究生。

在进行融化数值计算模型验证时,上述实验装置可简化为只有一面加热的 2-D 矩形区域,这种换热方式在相变储能系统中很常见^[7-8]。基于计算精度与计算时间的综合考虑,这里只选了一个体积较小的材料进行实验来验证模型分析的合理性,计算区域为 20 mm×60 mm 的矩形,如图 2 所示。

3 数学模型

为模拟出固体石蜡中的导热、液体石蜡中的导热与自然对流换热、相界面移动及相变材料在相变过程中的体积变化等一系列影响相变材料充放热过程的物理现象,计算采用焓-多孔介质模型及 VOF 模型。

3.1 VOF 模型

为求解相变材料在融化过程中的体积膨胀,采用 VOF 模型求解石蜡与空气接触的自由表面的位置。求解区域包括石蜡和空气,其中空气为第一相、石蜡为第二相,区域内所有变量和物性参数都是由体积平均值来替代,变量和物性参数在给定的单元中或者是单相或者是几相的混合物,这要依据各相在单元中的体积分数来确定,也就是说如果将单元中第一相流体的体积分数定义为 α_1 ,那么就有以下的条件:当 $\alpha_1 = 0$ 表示单元中充满第二相流体;当 $\alpha_1 = 1$ 表示单元中充满第一相流体;当 $0 < \alpha_1 < 1$ 表示单元中有第一相流体与第二相流体的界面。基于 α_1 的值来确定求解区域内各单元的变量和物性参数。

不同相间的相界面可以通过求解各相体积分数的连续方程获得。

第二相的连续方程为:

$$\frac{\partial \alpha_2 \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_2 \rho_2 u}{\partial x} + \frac{\partial \alpha_2 \rho_2 v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

其中,第一相的体积分数为:

$$\alpha_1 = 1 - \alpha_2 \quad (2)$$

控制体中其它守恒方程的物性参数由单元中各组分的百分比决定,例如密度: $\rho = \alpha_1 \rho_1 + (1 - \alpha_1) \rho_2$,其它物理量的确定方法类似。

3.2 焓-多孔介质模型

利用焓-多孔介质模型来求解石蜡的相变问题。对于大部分的相变体系,多相(固液)区表现为一可渗透的致密固相基质,相变材料在融化过程中的流动类似于通过多孔介质的流动问题,通过在 N-S 方程的源项中使用描述在多孔介质中流动的 Darcy

项来模拟相变材料在发生相变前后的流动状态的变化。用焓法来求解相变过程中能量的交换与相变材料内的温度分布。焓法是以介质的焓及温度同时作为求解变量,对包括固相区、液相区及糊状区在内的整个区域建立统一的守恒方程,求出热焓的分布后,由已知的焓与温度的关系式求得节点的温度值。通过温度分布进而确定相界面的位置。

在求解区域中只求解混合相的动量方程,也就是说不区分固相液相,也不区分石蜡与空气,各相通过求解平均控制体的物性参数来影响动量方程。

动量方程:

X 方向:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} + A u \quad (3)$$

Y 方向:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} - \rho g + A v \quad (4)$$

$$A = -C \frac{(\alpha_2 - \alpha_2 \gamma)^2}{(\alpha_2 \gamma)^3 + \epsilon} \quad (5)$$

式中: C—石蜡融化糊状区内表示形态的常数, $C = 10^5$; ϵ —避免分母为零的一个微小量,取值为 $\epsilon = 0.001$; γ —石蜡的液相分数,定义为:

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{当 } T_p \leq T_s \\ 1 & \text{当 } T_p \geq T_l \\ \frac{T_p - T_s}{T_l - T_s} & \text{当 } T_s < T_p < T_l \end{cases} \quad (6)$$

空气的流速也可以用上述方法求解,当单元充满空气 $\alpha_2 = 0$ 使 $A = 0$ 式(3)和式(4)即为标准 N-S 方程。

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u E)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v E)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (7)$$

能量方程中的焓 E 是控制体中各相焓的质量平均值:

$$E = \frac{\alpha_1 \rho_1 E_1 + \alpha_2 \rho_2 E_2}{\alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2} \quad (8)$$

$$E_2 = h + \gamma L \quad (9)$$

式中: E_1 —第一相的比焓; E_2 —第二相的比焓,其值为石蜡的显焓 h 和由相变引起的潜焓变化 γL 之

和。

3.3 边界及初始条件的设置

计算区域如图 2 所示, 左侧边界为定温加热表面, $T_{left\ heat}=343\ K$ 右边界和下边界都是绝热表面, $\frac{\partial T}{\partial x}|_{right}=\frac{\partial T}{\partial y}|_{right}=0$ $\frac{\partial T}{\partial x}|_{bottom}=\frac{\partial T}{\partial y}|_{bottom}=0$; 上表面为压力出口条件, 出口为大气压。最初石蜡与空气的温度 $T_{initial}=300\ K$ 石蜡在容器中占据 2/3 的体积, 空气占有 1/3 的体积, 初速度均为零。

3.4 物性参数

石蜡的相变潜热利用差示扫描量热仪 (DSC) 进行测量, DSC 曲线如图 3 所示, 石蜡的 DSC 曲线有两个峰, 温度较低的峰为固-固转变峰, 其下面的面积为固-固相变潜热, 温度较高的峰为固-液转变峰, 其下面的面积为固-液相变潜热。

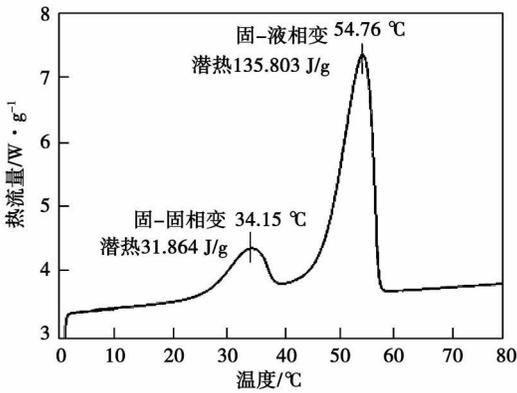


图 3 石蜡的 DSC 测试

导热系数利用瞬态平面热源法测量; 液体石蜡的粘度利用 Brookfield 粘度计测量, 测量结果如表 1 所示。

表 1 石蜡的物性参数

石蜡	固体 (32 °C)	液体 (70 °C)
导热系数 / $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	0.28	0.15
比热 / $kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	2.4	1.8
密度 / $kg \cdot m^{-3}$	870	760
粘度 / $kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$	—	0.008 12

4 计算结果分析

4.1 融化过程中石蜡的体积膨胀

图 4 为石蜡分别在 0、30、300 及 600 s 时由于体积变化引起的界面上升情况及融化过程中固-液界面位置。图中对计算结果与实验的可视化结果进行

了对比, 结果表明计算方法是可靠的。从图中可以看出在融化的最初阶段, 靠近加热壁面的石蜡开始融化, 由于液体石蜡的密度比固体石蜡的小, 所以石蜡在融化过程中体积膨胀, 产生的液体石蜡沿石蜡与空气的界面向右流动, 但在流动过程中由于接触到冷的固体石蜡以及被上部空气的冷却而又出现了凝固, 如图 4 (b)。随着石蜡的融化过程的进行, 产生了越来越多的液体石蜡并在重力作用下不断向位置较低的右侧流动, 最后液体石蜡占据了整个自由表面, 完全覆盖固体石蜡表面。在接下来的融化过程中, 自由表面由于石蜡的体积膨胀而不断上升, 这种趋势一直延续到石蜡完全融化为液体并达到 343 K 为止。对比初始时固体石蜡的体积与融化结束时液体石蜡的体积, 石蜡在融化过程中体积膨胀了近 10%。

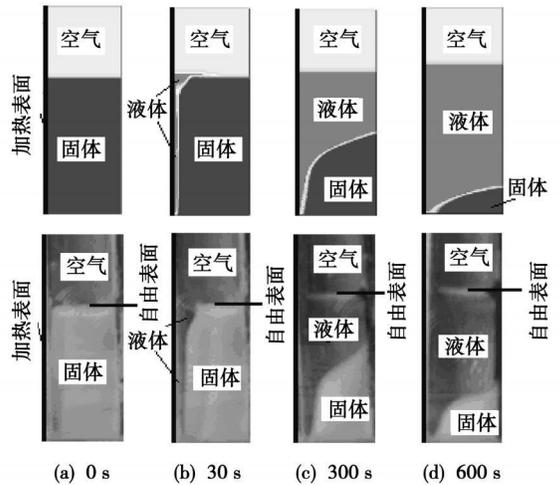


图 4 石蜡融化过程中的体积变化及固-液界面位置

4.2 液体石蜡中的自然对流

从图 4 中可以看出在融化的最初阶段, 靠近加热壁面的石蜡首先融化, 在这个阶段的融化界面几乎平行于加热壁面, 换热方式主要是导热, 但这个阶段维持时间很短, 很快就进入以对流为主要换热方式的阶段。随着融化过程的进行, 液体石蜡不断增加, 靠近壁面的高温液体石蜡与在相界面附近位置的刚融化的低温液体石蜡在密度差的驱动下产生了自然对流, 如图 5 所示; 靠近加热壁面的液体石蜡在向上运动, 而靠近融化界面的刚刚融化的温度较低的石蜡在向下运动。在自然对流的作用下, 高温石蜡流向石蜡的上部进而加速了容器上部石蜡的融化, 而下部不断有相对温度较低的液体石蜡补充进

来,下部石蜡的融化界面附近处的液体石蜡温度与相变温度接近,所以下部的相界面在长时间内几乎保持不变。在融化过程快结束时,剩余石蜡融化速度变慢,这是因为液体石蜡中温度趋于一致,而且存在于加热面和相变界面间的自然对流的作用范围随着融化界面的下移变小,自然对流作用已经不明显;另外,液体石蜡的导热系数较固体石蜡的低,这些原因都使融化过程大大减慢。

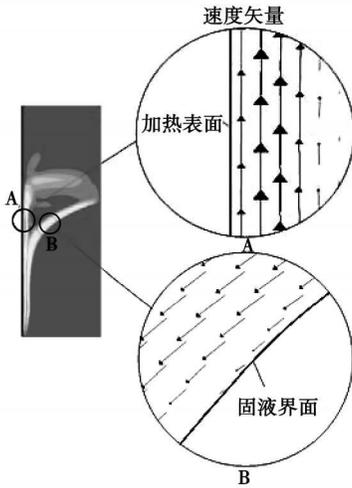


图 5 150 时液体石蜡内部流场的速度矢量

液体石蜡中的自然对流在整个融化过程中出现了 3 个明显的阶段:出现、旺盛的发展及减弱,如图 6 所示。在液体石蜡内部的最大流速先增大后减小,液体石蜡中的流速在融化 150 左右达到最大值 $6.08 \times 10^{-3} \text{ m/s}$,到达最大值后缓慢下降,这是因为石蜡中的温差决定的自然对流的作用。开始融化时,液体石蜡较少,自然对流较弱,随着融化的进行,液体石蜡增多,自然对流增强;由于自然对流的作用范围是在加热面和相变界面之间,随着融化的进行,相变界面高度降低,所以重力作用下的自然对流的流速也在减小,自然对流减弱。

自然对流直接影响了石蜡的融化速度,如图 7 所示。从图中可以看出在自然对流处于旺盛期的 150 左右,单位时间的融化百分比也达到最大。接下来随着自然对流的减弱,单位时间的融化百分比越来越减小、融化越来越慢。在 400 时石蜡融化了 66%,也就是说用了整个融化时间的一半完成了材料融化的 2/3 而后相同时间只融化了石蜡的 34%。通过计算单位时间内的融化百分比,可知最大融化速率为每秒 0.002 005%,而到 780 时的融化速率为每秒 0.000 395%。从石蜡融化的整个过

程可以看出,石蜡内部的自然对流在石蜡的融化过程中起到非常重要的作用。

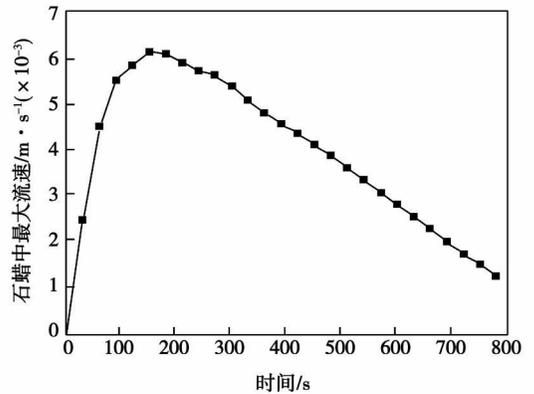


图 6 液体石蜡中最大流速在融化过程中的变化

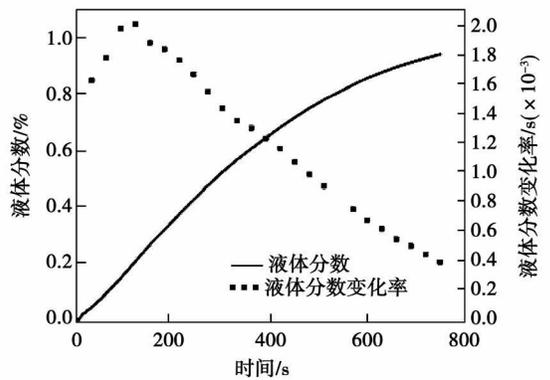


图 7 石蜡在融化过程中的融化率变化曲线

通过耦合求解 VOF模型与焓-多孔介质模型,研究了石蜡相变过程中的一些相互关联的物理现象,但所做研究仍处于初步阶段,在接下来的研究中还将进一步利用该模型对相变这一复杂过程进行深入探讨,例如利用该模型对材料物性、操作条件及几何参数等在瞬态相变和潜热传递过程中的作用机理进行研究。

5 结论

研究了耦合求解 VOF模型与焓-多孔介质模型,模拟出石蜡相变过程中的相互关联的多种物理现象。并利用可视化实验对模型的准确性进行了验证。结果表明:

(1) 石蜡内部的自然对流在石蜡的融化过程中

起到非常重要的作用,在自然对流的旺盛期,石蜡的最大融化速率为每秒 0.002 005%,而到融化快结束的自然对流减弱期融化速率为每秒 0.000 395%;

(2) 融化过程对自然对流也有影响,石蜡中的温差及相界面位置决定了自然对流的发展,在液体石蜡内部的最大流速先增大后减小,液体石蜡中的流速在融化 150 s 左右达到最大值 $6.08 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 。

(3) 石蜡在整个融化过程中体积膨胀了近 10%。

VOF模型与焓-多孔介质模型的耦合计算模型可以较完整的反映出材料相变过程中的各方面特征,可以用于相变现象和潜热系统性能的研究。

参考文献:

- [1] 叶 宏,赵 晓,程丹鹏,等.管壳式相变换热器贮热换热效果的数值研究[J].太阳能学报,2008,29(12):1499-1503
 [2] 管鲁京,张加迅,李劲东.相变材料熔化过程中自然对流振荡现象数值计算研究[J].中国空间科学技术,2009(1):19-25.

- [3] GONG Z X, MUJUMDAR A S. Enhancement of energy charge-discharge rates in composite slabs of different phase change materials [J]. Heat Mass Transfer 1996, 39: 725 - 733
 [4] 姜益强,齐 琦,姚 杨,等.圆柱形壳管式相变蓄热单元的蓄热特性研究[J].太阳能学报,2008,29(1):29-34
 [5] SHAIKH S, LAFDIK. Effect of multiple phase change materials (PCMs) slab configurations on thermal energy storage [J]. Energy Conversion and Management 2006, 47: 2103 - 2117
 [6] REGINA F, SOLANKI SC, SANI JS. Latent heat thermal energy storage using cylindrical capsule: numerical and experimental investigations [J]. Renewable Energy 2006, 31: 2025 - 2041.
 [7] VERMA P, SINGAL SK. Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase change material [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2008, 12(4): 999 - 1031.
 [8] ANITA T, KRISTIAN L, BERMARD F. Analysis of the influence of operating conditions and geometric parameters on heat transfer in water/paraffin shell-and-tube latent thermal energy storage unit [J]. Applied Thermal Engineering 2006, 26: 1830 - 1839.

(编辑 陈 滨)

新技术、新工艺

利用废热生产电能的双螺旋膨胀器发电机组

据《Diesel & Gas Turbine World》2009年 10月 号报道,美国内华达州里诺市的 ElectraTherm公司已研制并正在销售绿色废能发电机,该机器可以捕获废弃的能量并把它转换成电力。

在美国,ElectraTherm公司的产品可以回收这部分损失的能量,用来产生相当于 92 500 MW 天然气联合循环电站输出的电力。

GreenMachin(绿色机器)可以把 93.3 °C (对于流体)和 149 °C (对于气体)的低温热量转换成电力,供现场消费或把它供到电网。例如,93.3 °C 的废热可以由办公大楼普通的锅炉或冷却器给出。

ElectraTherm技术的特点是闭回路结构上的兰金循环,使用由蒸发器捕获的剩余热量使工作流体蒸发成气体。然后,气体在单路闭合管道系统内膨胀。膨胀的气体推动一个具有两个小的螺旋形转子并取得专利的双螺旋膨胀器,以驱动一个发电机。蒸汽在冷凝器内被冷却和冷凝并回到液体状态。工作流体是一种冷却液,被泵压到更高的压力并回到蒸发器,以便重复这一过程。

与惯用的涡轮膨胀器比较,双螺旋膨胀器具有更高的效率和可靠性,价格仅为涡轮膨胀器的十分之一。

(吉桂明 摘译)

基于符号焓经济学的冷热电联供产品成本分摊 = Cost Amortization of Combined Cooling Heating and Power Supply Products Based on Symbolic Exergoeconomics [刊, 汉] / SUN Jinq ZHANG Jun-li GE Bin (College of Energy Source and Environment Southeast University Nanjing China PostCode: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 501 ~ 504

With a 600 MW heat supply unit in Nanjing Thermal Power Plant serving as an example, the symbolic exergoeconomic theory and method combining the exergy flux in the thermodynamics with the cost in economics were used to establish a model for calculating cooling-heating-power cogeneration systems and obtain the cost amortization of the cogeneration in the thermal power plant. During the formation of the three kinds of products, the model in question was used to examine the change in the value of exergy flux, not only taking into account the exergy content of the three products, but analyzing in depth the exergy loss caused by them during the formation of the products. The exergy costs of the products were determined in combination with the pricing according to the exergy and compared with the costs calculated by using the heat quantity method. The calculation and analytic results show that the application of the symbolic exergoeconomics for a combined cooling-heating-power cogeneration system is practical and feasible, thus providing a basis for rationally pricing the three products and contributing to the sustainable development of the combined cooling-heating-power cogeneration systems. Key words: combined cooling heating and power supply; cost amortization; symbolic exergoeconomics

具有自由表面的固-液相变的数值模拟与实验研究 = Numerical Simulation and Experimental Study of the Solid-Liquid Phase Change on Free Surfaces [刊, 汉] / XIA Li ZHANG Peng WANG Ru-zhu (Refrigeration and Cryogenics Research Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, PostCode: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 505 ~ 509

Through an analysis of the phase change phenomena, established was a coupled calculation model of a VOF (volume of fluid) sub-model with an enthalpy-porous medium one. By utilizing the model in question, simulated were several kinds of physical phenomena correlated during the phase change of paraffin, including heat transfer in the solid paraffin, that in the liquid paraffin, natural convection in the liquid paraffin, phase interface shift and change in the volume of the phase change material during its phase change etc. The calculation results show that the natural convection inside the paraffin plays a very important role in the melting process of the paraffin. During the high-tide of the natural convection, the maximum melting speed of the paraffin can reach 0.002 005% per second. In the meantime, the melting process also affects the natural convection. The flow speed in the liquid paraffin can reach its maximum value (6.08×10^{-3} m/s) when the melting process lasts around 150 seconds. During the whole melting process, the paraffin expands approximately by 10% in volume. By making use of a visual test of the phase change of the paraffin, the accuracy of the numerical simulation was verified. The research results show that the mathematical model in question can comparatively realistically and completely reflect the characteristics of the paraffin in various aspects during its phase change. Key words: phase change; VOF (volume of fluid) model; enthalpy-porous medium model; numerical simulation