

文章编号: 0254-0096(2002)01-0027-05

# 非理想相变特性材料热性能简化分析方法及适用条件

李 震, 张寅平, 江 亿

(清华大学热能工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 采用焓法, 分析了蓄能相变材料相变区比热特性对其蓄换热性能的影响。该方法对潜热型蓄换热系统的热性能分析和计算是普适的。针对该方法较为复杂而理想相变材料(相变温度为一点)热特性的分析较为简单并有大量结果可供参考的特点, 讨论了采用对理想相变材料适用的蓄换热性能分析方法和公式来计算相变温度为一点温度区间的非理想相变材料蓄换热特性的适用条件。所得结论拓宽了理想相变材料蓄换热性能分析方法及分析结果的适用范围。在很多情况下, 大大简化了非理想相变材料蓄换热性能的分析 and 计算, 对各种蓄能相变换热器的设计和性能优化具有指导意义。

**关键词:** 相变; 传热; 蓄热; 焓法

中图分类号: TK512<sup>+</sup>.4

文献标识码: B

## 0 引 言

蓄能相变换热器在太阳能利用、空调蓄冷和采暖蓄热等领域中有广泛应用<sup>[1]</sup>。蓄能相变换热器的形式有多种, 按结构形式可分为板式、管式、同心套管式和球体堆积床式相变换热器等。所采用的相变材料种类也很多, 但我们认为, 按其相变过程中比热特性, 它们可分为理想和理想非理想相变特性材料。前者的融化和凝固过程发生在一个温度点(融点)上, 而后者融化和凝固过程则发生在一个温度区间上。

对于理想相变特性材料, 其传热过程和由其构成的相变蓄换热器的热性能分析已较为成熟。由于其具有相变温度为一点的共性特征, 因此对一些典型几何形状的相变单元构成的相变蓄换热器的蓄换热性能, 可以用概括性很强的无量纲公式来描述。这些公式既概括了该类蓄热器蓄换热性能的本质特征, 又使其热性能分析和计算大大简化<sup>[2~4]</sup>。

对非理想特性材料, 由于其相变过程中比热特性各异, 虽然其热性能可采用焓法分析<sup>[5,6]</sup>, 但很难概括其蓄换热共性特征。实际上, 只要相变区间足够小, 理想相变特性材料和非理想相变特性材料的相变过程的差别应很小, 此时, 非理想相变材料的相

变蓄换热特性分析可大大简化, 甚至可直接套用对理想相变材料适用的无量纲蓄换热性能公式。要达此目的, 须弄清: (1) 相变区比热特性对相变材料蓄换热特性的影响, (2) 对给定的误差范围, 在何条件下, 非理想相变材料可当作理想相变材料处理。本文对上述问题进行了研究, 得到了一些有启发性的结论。

## 1 非理想相变特性材料相变传热分析

迄今为止, 焓法是分析非理想相变特性材料传热性能的最佳方法<sup>[5,6]</sup>。其主要思路是将温度和焓作为待求变量, 得到含有这两个变量的能量方程, 再由材料温度与焓之间的关系, 求得温度分布。它不必跟踪相变界面, 且能量方程适用于固相、液相及相变区, 使问题大大简化, 尤其适用于解决多维问题。

对于二维相变传热问题, 忽略液相自然对流, 可得出以下形式的导热方程:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (1)$$

式中,  $h$ ——焓, J/kg;  $T$ ——温度, °C;  $k$ ——导热系数, W/(m·°C);  $\rho$ ——密度 kg/m<sup>3</sup>;  $\tau$ ——时间, s;  $x, y$ ——坐标。

一般情况下, 焓与温度的对应关系为:

收稿日期: 2000-11-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59776030)

$$h = \int_{T_0}^{T_1} c_{p,s} dT + \int_{T_1}^{T_2} c_{p,m} dT + \int_{T_2}^T c_{p,l} dT \quad (2)$$

其中,  $c_{p,s}$ ——固态材料的比热,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  
 $c_{p,m}$ ——材料在相变温度区间(模糊区)的比热,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  
 $c_{p,l}$ ——液态材料的比热  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  
 $T_0$ ——焓的计算基准点,  $^\circ C$ ;  $T_1$ 、 $T_2$ ——相变区起始和终了温度,  $^\circ C$ ; 一般情况下, 在温度范围不大时,  $c_{p,s}$ 、 $c_{p,l}$  可视为常数, 见图 1。

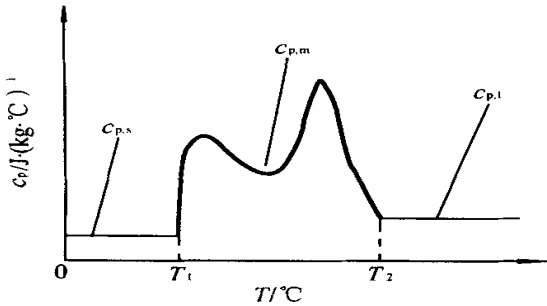


图 1 相变材料的比热与温度的一般关系

Fig. 1  $c_p-T$  Chart of phase change material

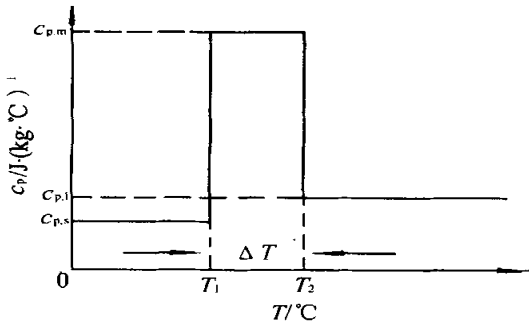


图 2 相变材料比热与温度的简化关系

Fig. 2  $c_p-T$  Chart of phase Change material

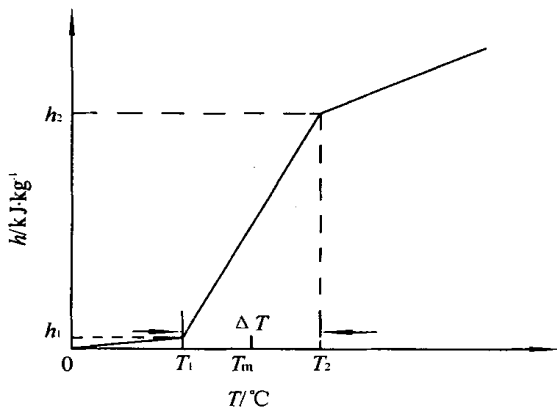


图 3 相变材料的焓值与温度对应关系

Fig. 3  $h-T$  Chart of phase Change material

考虑最简单的情况, 即  $c_{p,l}$  为一定值的情况, 见

图 2, 图 3。图 2 中,  $c_p-T$  关系可表示如下

$$c_p(T) = \begin{cases} c_{p,s} & (T \leq T_1) \\ c_{p,m} & (T_1 < T < T_2) \\ c_{p,l} & (T \geq T_2) \end{cases} \quad (3)$$

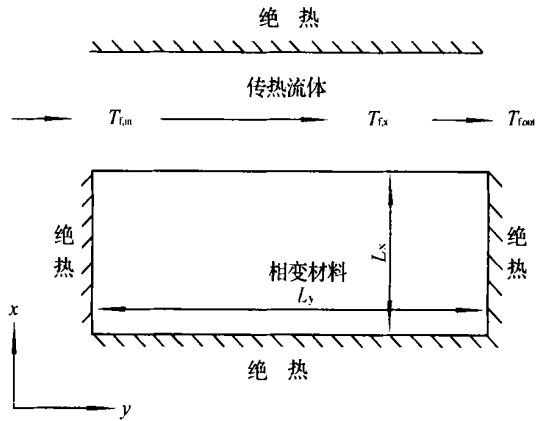


图 4 通用相变换热器模型示意图

Fig. 4 Simple Model of heat exchanger with PCM

此情况下, 式(2)可简化为

$$h = \begin{cases} c_{p,s}(T - T_1) & (T \leq T_1) \\ h_1 + c_{p,m}(T - T_1) & (T_1 < T < T_2) \\ h_2 + c_{p,l}(T - T_2) & (T \geq T_2) \end{cases} \quad (4)$$

根据文献<sup>[4]</sup>, 由相变单元重迭放置构成的相变蓄热换热器都可用图 4 统一表示。对其它相变蓄换热器(如球形堆积床、管式和板式换热器), 图中的标注尺寸各有其表达式计算<sup>[4]</sup>。

定义以下无量纲参数

$$Y = \frac{y}{L_y}, \quad X = \frac{x}{L_x}, \quad \Delta = \frac{L_y}{L_x},$$

$$\theta = \frac{T - T_m}{T_{f,in} - T_m}, \quad F_o = \frac{k\tau}{\rho c_{p,s} L_x^2}$$

$$H = \frac{h}{c_{p,s}(T_{f,in} - T_m)}, \quad Ste = \frac{c_{p,s}(T_{f,in} - T_m)}{H_m}$$

其中,  $T_m = (T_1 + T_2)/2$ ,  $H_m = h_2 - h_1$ , 表示融解热,  $J/kg$ 。

将无量纲数代入方程(1)得

$$Ste \cdot \frac{\partial H}{\partial F_o} = \frac{\partial \theta}{\partial X^2} + \frac{1}{\Delta^2} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial Y^2} \quad (5)$$

对图 4 所示的情况, 方程(5)的无量纲边界条件为

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{x=L} = Bi(\theta - 1) \quad (6)$$

$$Bi = \frac{UL_x}{k} \quad (7)$$

式中,  $U$ ——对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

对于传热流体, 可有如下方程:

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial Y} = -NTU(\theta_f - \theta_{Lx,y}) \quad (8)$$

$$NTU = \frac{UL_y}{m_f c_{p,f}} \quad (9)$$

式中,  $m_f$ ——单位宽度上的流体质量流量,  $kg/(s \cdot m)$ ;  $c_{p,f}$ ——流体的比热,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;

根据上述模型, 编写二维也纳传热计算程序, 由于涉及焓与温度两个变量, 迭代过程采用 SOR(逐次超松弛迭代) 方法, 对于网络数不是很多的情况下, 能够得到满意的收敛速度和计算精度。

## 2 计算结果与讨论

计算中取相变材料的初始温度  $T_0 < T_1$ , 而传热流体的进口温度  $T_{f,in} > T_2$ 。图 5—图 6 分别显示了不同条件下, 相变区域导热的一些特点。

### 2.1 相变区间比热特性对储热性能的影响

在选择相变材料时, 潜热和相变温度是很重要的因素, 一般说来, 作为蓄热材料, 潜热越大越好。而对于相变温度, 大多数材料的相变温度都不是一个温度点。一些分析方法一般把相变温度处理成单点温度, 使计算大大简化, 并得到一些有一定普适性的相变蓄换热器的无量纲蓄热性能的公式<sup>[2-4]</sup>。下面通过研究材料表的热流来分析这样的简化会带来的误差。

为了便于比较和分析, 定义两个无量纲参数:

$$\bar{q} = \frac{\int q dt}{H_m \cdot M} \quad \Delta\theta = \frac{\Delta T}{T_{f,in} - T_m}$$

其中,  $\bar{q}$ ——无量纲蓄(换)热量;  $q$ ——材料与热流体接触面的传热速率,  $W$ ;  $M$ ——材料的质量,  $kg$ ;  $\Delta\theta$ ——无量纲的相变温度范围。

图 5 给出了具有不同相变温度范围但潜热相同的材料在融化过程中表面热流的逐时变化。图中纵坐标表示  $\bar{q}$  的变化率, 相当于无量纲的热流。可以看出由于相变温度范围不同其表面热流的大小也是不同的。由于相变温度范围的存在, 会使材料的蓄热量与单点相变温度的材料相比先快后慢。

图 6 给出了相变温度范围不同而导致总蓄热量  $\bar{q}$  的相对偏差的逐时变化情况, 这种偏差是相对于

相变温度是一个温度点的情况, 这个偏差用  $\delta$  表示。

根据描述相变传热过程控制方程及其边界条件,  $\delta$  与诸多因素有关, 其中包括:  $\Delta\theta$ ,  $Ste$ ,  $c_p$ — $T$  曲线特性,  $Bi$ ,  $Fo$ ,  $NTU$  等。其中  $NTU$ 、 $Bi$  数的影响非常小, 若选取图 6 中  $\delta$  最大的点  $\delta_{max}$  来研究, 则  $Fo$  的影响也不考虑。影响  $\delta_{max}$  的主要因素就只有  $Ste$  和  $\Delta\theta$  以及  $c_p$ — $T$  曲线特性。 $\Delta\theta$  的范围应该 0~2 之间,  $Ste$  的影响又可分来流温度  $T_{f,in}$  的影响及潜热  $H_m$  的影响来考虑, 由此, 问题就简化为研究在不同  $T_{f,in}$  和  $H_m$  以及  $c_p$ — $T$  曲线特性下,  $\Delta\theta$  对  $\delta_{max}$  产生的影响。图 7 表示的是在相同潜热特性但  $T_{f,in}$  不同的情况下  $\delta_{max}$  与  $\Delta\theta$  的关系。可以明显看出  $T_{f,in}$  相对于  $\Delta\theta$  也是很弱的影响因素。这样, 问题就大大简化, 转化为研究  $H_m$ 、 $\Delta\theta$  和  $c_p$ — $T$  曲线特性对  $\delta_{max}$  的影响。下面, 就这三种因素分别讨论。

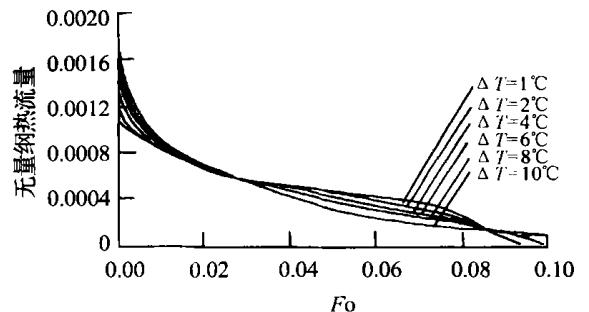


图 5 相变温度范围对边界热流量的影响

Fig. 5 influence of the temperature range of melting

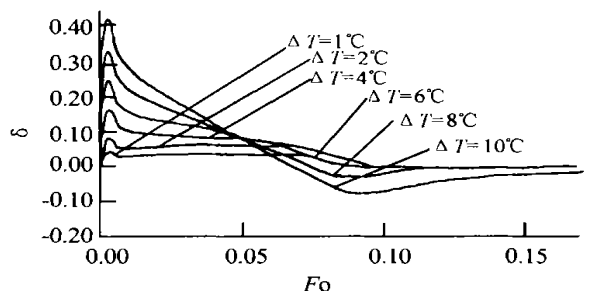
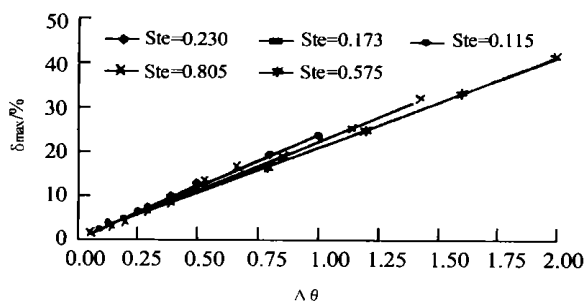
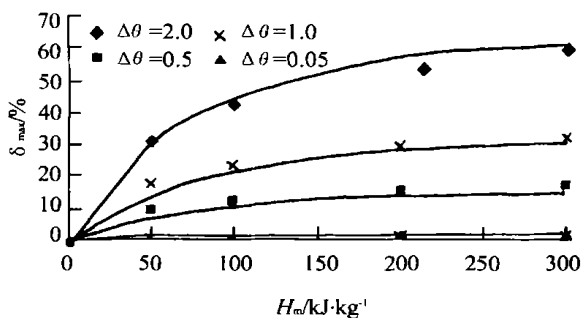
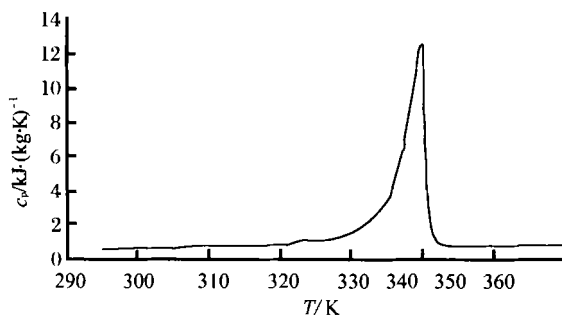
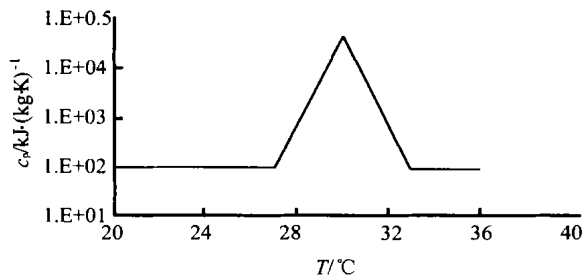


图 6 相变温度范围不同而导致边界热流量的相对偏差示意图 ( $Ste = 0.0575$ )

Fig. 6  $\delta$  chart of different temperature range of melting

#### 1) $\Delta\theta$ 和 $H_m$ 的影响

由图 7 中模拟分析的结果,  $\delta_{max}$  随着  $\Delta\theta$  的增加而线性增加;  $\delta_{max}$ — $\Delta\theta$  线的斜率由相应的  $H_m$  决定,  $H_m$  越大, 斜率就越大。图 8 中的数据点表示不同的  $\Delta\theta$  下  $\delta_{max}$  随  $H_m$  的变化情况, 根据图 8 的数据,

图 7 不同  $T_{f, in}$  下  $\delta_{max}$  与  $\Delta\theta$  关系Fig. 7  $\delta$  chart of different  $T_{f, in}$  and different  $\Delta\theta$ 图 8 潜热、 $\Delta\theta$  对  $\delta_{max}$  的影响Fig. 8  $\delta$  chart of different  $H_m$  and different  $\Delta\theta$ 图 9 硬脂酸溶化时的时间  $c_p$ — $T$  关系Fig. 9  $c_p$ — $T$  chart of stearic acid图 10  $c_p$ — $T$  曲线Fig. 10  $c_p$ — $T$  chart

$$\delta_{max} = 0.31 \cdot \Delta\theta \cdot (1 - e^{-0.013H_m}) \quad (10)$$

图 8 中的曲线表示的是根据公式计算出来的值。公式(10)可用来估算忽略相变温度范围带来蓄热量的差别,这个差别是最大可能偏差。

## 2) $c_p$ — $T$ 曲线特性

实际物质的比热特性是比较复杂的,  $c_p$ — $T$  曲线可能为各种形状,如图 9 所示为硬脂酸的  $c_p$ — $T$  曲线就是三角波的形状<sup>[7]</sup>。前面的分析是基于  $c_p$ — $T$  曲线为图 2 所示的方波形的情况下作出的。传热越是集中发生于  $T_m$ ,  $c_p$ — $T$  曲线中  $c_p$  的峰值越是靠近  $T_m$ ,  $\delta_{max}$  就会越小;反之,若  $c_p$ — $T$  曲线的峰值分布在相变温度范围的边缘,如图 1 中所示的情况,  $\delta_{max}$  就会越大。对于不是特别极端的情况下,仍可近似将其处理成方波的形式,采用公式(10)进行误差分析。

## 2.2 算例

如图 10 所示就是三角波的形状,其潜热为 150kJ/kg,相变温度范围为 6°C(27°C~33°C),初始温度 25°C。用前面的算法对其进行计算,得到的  $\delta_{max}$  为 0.078。若将其  $c_p$ — $T$  曲线处理成图 1 的形式,相同潜热,相同相变温度范围下计算得到的  $\delta_{max}$  为 0.1。查图 8 或利用公式(10),得到的  $\delta_{max}$  为 0.1 左右。

## 3 结 论

本文采用焓法,分析相变传热问题,着重分析了相变区比热特性对相变材料的蓄换热特性的影响,计算结果表明,相变温度范围的存在,对蓄热材料的蓄热速度相对于理想的相变材料在开始时加快,一段时间后减慢;而这种影响的显著程度受相变潜热及  $c_p$ — $T$  曲线的形状的影响。

本文讨论了非理想相变特性材料蓄热性能简化分析方法及其最大相对误差,给出了相应的估算公式。对给定的误差要求,存在  $\Delta\theta$  的临界值  $\Delta\theta_c$ ,当  $\Delta\theta < \Delta\theta_c$  时,非理想相变材料可当作理想相变材料处理。

## [参考文献]

- [1] 张寅平,胡汉平,孔祥东等. 相变贮能—理论和应用 [M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1996.
- [2] 江 邑,张寅平,江 亿等. 板式相变储换热器的储换热准则[J]. 清华大学报,1999,39(11): 86—89.

拟合出以下的近似公式:

- [3] Zhu Yingqiu, Zhang Yinping, Jiang Yi, et al. Thermal storage and heat transfer in phase change material outside a circular tube with axial variation of the heat transfer fluid temperature [ J ] . J. of Solar Energy Engineering, Trans. ASME, 1999, 121: 145—149.
- [4] Kang Yanbin, Zhang Yinping, Jiang Yi, et al. A general model for analyzing the thermal characteristics of a class of latent heat thermal energy storage system [ J ] . J. of Solar Energy Engineering, Trans. ASME, 1999, 121: 185—193.
- [5] Cao Yiding, Amir Faghri, Won Soon Chang. A numerical analysis of Stefan problems for generalized multi-dimensional phase-change structures using the enthalpy transforming model [ J ] . Int J of Heat Mass Transfer, 1989, 32 (7): 1289—1298.
- [6] Shamsunder N, Sparrow E. M Analysis of multidimensional conduction phase change via the enthalpy model [ J ] . J. of Heat Transfer, Trans. ASME, 1975, 19: 333—340.
- [7] 于士君, 孟霜鹤等. 硬脂酸的热容及热力学性质研究 [ J ] . 太阳能学报, 2000, 21(2): 171—175.

## EFFECT OF SPECIFIC HEAT OF PHASE CHANGE MATERIAL ON HEAT CHARGING OR DISCHARGING PERFORMANCE

Li Zhen, Zhang Yinping, Jiang Yi

( Department of Building Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China, )

**Abstracts:** In this paper, by using enthalpy method, the effect of characteristics of the specific heat of phase change material in its phase change process is analyzed. The method is generally applicable for analyzing the thermal performance of latent heat storage systems. The condition of using the simple methods and the results for analyzing the thermal performance of non-ideal phase change material is discussed. The research results show that for practical phase change process the simple methods for ideal phase change process is applicable under some conditions. The research is helpful to the design and performance optimization of various latent heat storage systems.

**Keywords:** phase change; heat exchange; heat storage; enthalpy method

联系人 **E-mail:** lizhen98@mails. tsinghua. edu. cn