

文章编号:1001-9014(2011)01-0042-06

# 散射性半透明介质内红外热辐射与相变耦合换热

甄 欠<sup>1,2</sup>, 易红亮<sup>1</sup>, 谈和平<sup>1\*</sup>, 阮立明<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨商业大学 能源与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150028)

**摘要:** 半透明介质的相变传热必须考虑介质内红外热辐射传输的影响. 研究了二维矩形吸收、发射、各向同性散射性半透明介质的凝固过程. 假设凝固发生在某一温度区间, 因此须考虑液、糊、固三个区域. 采用有限体积法求解基于焓的能量方程, 蒙特卡洛法求解红外热辐射传输. 一维相变导热、二维瞬态红外热辐射与导热耦合换热的结果与文献进行了比较, 吻合较好. 分析了衰减系数、折射率、导热-辐射参数、潜热等参数对温度、液相率分布的影响. 研究表明一些热光学特性参数对半透明介质的凝固过程有显著影响.

**关键词:** 工程热物理; 辐射-相变耦合传热; 蒙特卡洛法; 半透明介质

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A

## Coupled infrared radiation and phase-change heat transfer in semitransparent medium

ZHEN Bing<sup>1,2</sup>, YI Hong-Liang<sup>1</sup>, TAN He-Ping<sup>1\*</sup>, RUAN Li-Ming<sup>1</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Energy and Civil Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

**Abstract:** The infrared radiation transfer should be considered together with other heat transfer process in the phase change of the semitransparent medium. Solidification heat transfer via absorbing, emitting and isotropically scattering in 2-D rectangular semitransparent medium were analyzed. Solidification was assumed to occur over a range of temperatures, and liquid-, mushy- and solid-zones were considered. The enthalpy-based energy equation was solved by the finite volume method. The infrared radiation transfer was solved by the Monte-Carlo method. The results of 1-D phase change heat conduction and 2-D transient coupled infrared radiation and conduction were in good agreements with published data. Effects of various parameters, such as extinction coefficient, refractive index, conduction-radiation parameter and latent heat, et al., on temperature and liquid fraction distributions in the medium were studied. Some of these thermal optical property parameters were found to have significant effects on the results.

**Key words:** engineering thermal physics; coupled heat transfer of radiation and phase change; Monte-Carlo method; semitransparent medium

**PACS:** 44.40.+a

## 引言

半透明材料的高温应用需要考虑热辐射特性<sup>[1]</sup>. 半透明材料典型的高温应用包括熔化和凝固过程, 光学晶体生长<sup>[2]</sup>、光学纤维的制造与应用<sup>[3]</sup>、玻璃的性能调制<sup>[4]</sup>等都涉及到这类问题. 因此研究半透明材料相变过程中的辐射换热对工业品质和工业安全有重要的意义. 分析半透明材料的熔化和凝固是比较困难

的. 内部红外热辐射对温度场有较大影响时, 相变传热更复杂、非线性更强. 热辐射在整个容积中发射、吸收和散射, 对传热和相变的贡献与不透明材料不同. 红外热辐射影响半透明材料中的熔化和凝固, 忽略这一点在预测液相率和温度分布时将导致严重偏差. Prisiakov<sup>[5]</sup>研究认为对于半透明相变材料(PCM), 内部辐射作用明显强化了传热, 热流在高温蓄热系统中要比不考虑热辐射时大2.5~6倍.

收稿日期: 2010-01-11, 修回日期: 2010-06-18

Received date: 2010-01-11, revised date: 2010-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50620120442, No. 50806018), 新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0067)

作者简介: 甄 欠(1973-), 男, 山东莒南人, 讲师, 博士生, 主要从事热辐射与相变耦合换热研究, E-mail: zb19730812@sina.com.

\* 通讯作者: E-mail: tanheping@hit.edu.cn.

上世纪 60 年代末, Viskanta 首先研究红外热辐射对半透明材料熔化和凝固的影响. 李佳玉<sup>[6]</sup>研究了在凝固过程中 3 种相态(液态、 $\gamma$ 相、 $\alpha$ 相)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子的吸收指数随相态的变化关系, 分析了不同相态  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子辐射特性随温度和波长的变化关系. Mishra<sup>[7]</sup> 假设凝固发生在一定温度范围内, 考虑了液、糊、固三个相区, 利用格子波尔兹曼和有限体积法分析了二维、吸收、发射、各向同性散射性半透明材料的相变. Lapka<sup>[8]</sup> 通过假设适当的液相率和温度的关系, 研究了半透明纯材料、共晶合金和二元合金三类材料的瞬态凝固过程.

在已经发表的文章里, 很少有文章考虑散射对二维半透明介质瞬态凝固过程的影响. 本文采用蒙特卡洛法求解红外热辐射传输, 有限体积法求解能量方程, 研究了二维半透明介质的红外热辐射与相变瞬态耦合换热特性, 重点讨论了各向同性散射条件下各种热光学特性参数对凝固过程的影响.

## 1 控制方程和边界条件

### 1.1 控制方程

如图 1 所示, 考虑二维吸收、发射、各向同性散射性半透明材料的凝固问题. 初始状态, 方腔内充满温度为  $T_i$  的液体. 西、东、南、北侧周围流体环境温度分别为  $T_{fw}$ 、 $T_{fe}$ 、 $T_{fs}$ 、 $T_{fn}$ , K. 西、东、南、北侧周围流体对流换热系数分别为  $h_w$ 、 $h_e$ 、 $h_s$ 、 $h_n$ ,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . 介质周围边界处有紧贴壁面的黑体辐射源, 西、东、南、北侧环境的辐射源温度分别为  $T_{rw}$ 、 $T_{re}$ 、 $T_{rs}$ 、 $T_{rn}$ , K. 假设: 忽略熔体周围固体壁面的导热热阻; 不考虑热膨胀作用以及流动的影响; 凝固发生在一个温度区间  $[T_s, T_l]$  内; 固相、液相及糊态区的热物性参数不同(比热分别为  $c_s$ 、 $c_l$ 、 $c_m$ , 导热系数分别为  $k_s$ 、 $k_l$ 、 $k_m$ ), 但不随温度变化. 下标“s”代表固相区, “mz”代表糊态区, “l”代表液相区. 在  $t > 0$  时刻, 南、北两侧边界流体温度  $T_{fs}$ 、 $T_{fn}$  保持  $T_i$  不变, 西、东两侧流体温度  $T_{fw}$ 、 $T_{fe}$  变为  $T_i/2$ .

半透明介质相变传热需要考虑红外热辐射传输, 其基于焓的控制方程为

$$C_{i,j} \frac{\Delta x_i \Delta y_j}{\Delta t} (T_{i,j}^m - T_{i,j}^{m-1}) = k_{i-1/2,j} \Delta y_j \frac{T_{i-1,j}^m - T_{i,j}^m}{(\delta x)_w} + k_{i+1/2,j} \Delta y_j \frac{T_{i+1,j}^m - T_{i,j}^m}{(\delta x)_e} + k_{i,j-1/2} \Delta x_i \frac{T_{i,j-1}^m - T_{i,j}^m}{(\delta y)_s} + k_{i,j+1/2} \Delta x_i \frac{T_{i,j+1}^m - T_{i,j}^m}{(\delta y)_n} + Q_{i,j}^{r,int} - \rho L \frac{f_l^m - f_l^{m-1}}{\Delta t} \Delta x_i \Delta y_j, \quad (6)$$

式中,  $C_{i,j}$  为控制体  $\Delta V_{i,j}$  的单位体积热容,  $= \rho_{i,j} c_{i,j}$ ,  $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ;  $k_{i-1/2,j}$ 、 $k_{i+1/2,j}$ 、 $k_{i,j-1/2}$ 、 $k_{i,j+1/2}$  分别为控制体西、东、南、北四侧的当量导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,

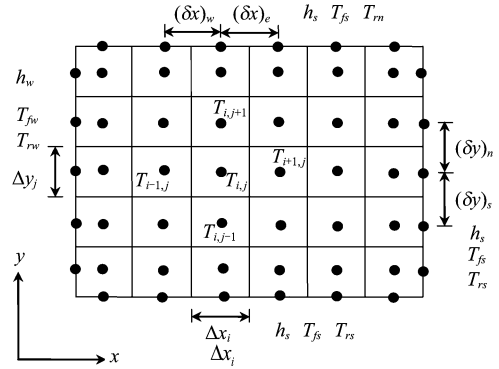


图 1 二维矩形介质离散模型

Fig. 1 Discrete model of two-dimensional rectangular medium

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = -\nabla \cdot (-k \nabla T) - \nabla \cdot \mathbf{q}_r, \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $h$  为焓,  $\text{J}/\text{kg}$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $k$  为导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为温度,  $\text{K}$ ;  $\mathbf{q}_r$  为辐射热流密度矢量,  $\text{W}/\text{m}^2$ . 其中,

$$h = c_p T + f_l L, \quad (2)$$

式中,  $L$  为相变潜热,  $\text{J}/\text{kg}$ ;  $f_l$  为液相率, 固相区  $f_l = 0$ , 糊态区  $0 < f_l < 1$ , 液相区  $f_l = 1$ .

将式(2)代入方程(1), 假定在特定区域(固相区、糊态区、液相区)内,  $\rho$ 、 $c_p$  保持常数, 不随时间变化, 式(1)可改写成方程

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) - (\nabla \cdot \mathbf{q}_r + \rho L \frac{df_l}{dt}) \quad (3)$$

在固相区、糊态区、液相区中, 液相率  $f_l$  和焓  $h$  的关系式确定如下<sup>[9]</sup>:

$$f_l = \begin{cases} 0 & h < h_s \\ (h - h_s)/(h_l - h_s) & h_s \leq h \leq h_l \\ 1 & h > h_l \end{cases}, \quad (4)$$

式中,  $h_s = c_p T_s$ ,  $h_l = c_p T_l + f_l L$ .

辐射热源用  $Q_{i,j}^{r,int}$  表示, 故有

$$Q_{i,j}^{r,int} = -\nabla \cdot \mathbf{q}_r \Delta V_{i,j}, \quad (5)$$

二维矩形离散网格如图 1 所示, 利用有限体积法离散能量方程式(3)为

按调和平均方法确定.

### 1.2 蒙特卡洛法求解红外辐射热源项

针对本文的物理模型, 利用辐射传递因子可得

到辐射热源项,可得:

$$Q_{i,j}^{r,int} = 4\sigma n^2 \kappa_a \left\{ \sum_{k=1}^{NX+2} \sum_{l=1}^{NY+2} \Delta x_k \Delta y_l \cdot 1 \cdot RD(k,l,i,j) [T_{k,l}^4 - T_{i,j}^4] \right\}$$

$$(i = 2,3, \dots, NX, NX+1, j = 2,3, \dots, NY, NY+1) \quad (7)$$

式中,  $Q_{i,j}^{r,int}$  是辐射内热源,  $W$ ;  $\Delta V_{i,j}$  是控制体的体积,  $m^3$ ;  $RD(k,l,i,j)$  是控制体  $k,l$  (发射) 与控制体  $i,j$  (吸收) 的辐射传递因子, 采用蒙特卡洛法求解;  $n$  是

$$Sc_{i,j}^{m,n+1} = 4\sigma \kappa_a n^2 \left\{ \sum_{k=1}^{NX+2} \sum_{l=1}^{NY+2} \Delta x_k \Delta y_l \cdot RD(k,l,i,j) [(T_{k,l}^{m,n})^4 + 3(T_{i,j}^{m,n})^4] \right\} \quad (i = 2,3, \dots, NX, NX+1, j = 2,3, \dots, NY, NY+1) \quad (8)$$

$$Sp_{i,j}^{m,n+1} = 16\sigma \kappa_a n^2 \left\{ \sum_{k=1}^{NX+2} \sum_{l=1}^{NY+2} \Delta x_k \Delta y_l \cdot RD(k,l,i,j) (T_{i,j}^{m,n})^3 \right\} \quad (i = 2,3, \dots, NX, NX+1, j = 2,3, \dots, NY, NY+1) \quad (9)$$

本文红外辐射热源项  $\nabla \cdot \mathbf{q}_r$  采用蒙特卡洛法<sup>[10]</sup>进行求解。

### 1.3 边界条件

西侧边界节点的能量交换包括: 西侧界面节点与介质内部所有节点 (包括其它界面节点) 的红外热辐射换热热量; 西侧界面节点与介质内部相邻节点的导热热量; 西侧界面节点与西侧环境辐射源红外热辐射换热热量; 西侧界面节点与西侧环境流体对流换热热量。西侧边界节点能量平衡方程为

$$Q_{1,j}^{int} + k_{1,j} \frac{T_{2,j} - T_{1,j}}{\Delta x_2/2} \Delta y_j$$

$$= Q_{(1,j) \rightarrow w} + h_w (T_{1,j} - T_{fw}) \Delta y_j \quad (11)$$

式中,  $Q_{1,j}^{int}$  是界面节点  $(1,j)$  与介质内部所有节点, 包括其它界面节点的红外热辐射换热热量,  $W$ ;  $T_{1,j}$  是西侧边界壁面温度,  $K$ ;  $Q_{(1,j) \rightarrow w}$  是界面节点  $(1,j)$  与西侧环境红外热辐射换热热量,  $W$ ;  $h_w$  是西侧对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ 。当对流换热系数无限大时, 介质表面温度  $T_{1,j}$  等于环境温度  $T_w$ , 此时即为定壁温的第一类边界条件。

假设介质边界不透明。根据能量平衡关系, 可得西侧边界条件方程如下:

$$4\sigma \kappa_a n^2 \left\{ \sum_{k=1}^{NX+2} \sum_{l=1}^{NY+2} \frac{\Delta x_k \Delta y_l \cdot 1}{\Delta y_j \cdot 1} RD(k,l,1,j) [T_{k,l}^4 - T_{1,j}^4] \right\} + k_{1,j} \frac{T_{2,j} - T_{1,j}}{\Delta x_2/2}$$

$$= \sigma [\varepsilon_w T_{1,j}^4 - T_{fw}^4] + h_w (T_{1,j} - T_{fw}) \quad (12)$$

式中,  $\varepsilon_w$  是西侧界面发射率。参照西侧边界节点的离散方程, 可以得出东、南、北侧边界类似的离散方程。

## 2 模型验证

对于半透明介质中的红外热辐射与相变耦合换热问题, 能获取的文献中缺乏足够的参数进行比较。因此本文将该问题的验证分解成两步, 第一步进行纯相变的比较, 第二步进行瞬态红外热辐射与导热耦合换热的比较。

介质的折射率;  $\kappa_a$  是吸收系数,  $m^{-1}$ ;  $\sigma$  为波尔茨曼常数,  $W/(m^2 \cdot K^4)$ 。

考虑非稳态问题的第  $m$  个时层第  $n+1$  次迭代, 将上述辐射热源项线性化, 得

$$Q_{i,j}^{r,int,m,n+1} = Sc_{i,j}^{m,n+1} - Sp_{i,j}^{m,n+1} T_{i,j}^{m,n+1} \quad (8)$$

式中,  $Sc_{i,j}^{m,n+1} = Q_{i,j}^{r,int,m,n} - (dQ_{i,j}^{r,int}/dT_{i,j})^{m,n} T_{i,j}^{m,n}$ ,  $Sp_{i,j}^{m,n+1} = - (dQ_{i,j}^{r,int}/dT_{i,j})^{m,n}$ 。

### 2.1 一维相变导热模型的验证

本文结果与文献[11]给出的精确值进行比较以验证相变导热模型的正确性。可供比较的精确值对应的模型为一维模型, 本文二维模型为与其比较, 设定  $L_y = 10L_x$ , 其他参数为:  $k_l/k_s = 0.6$ ,  $k_m/k_s = 0.76$ ,  $c_l/c_s = 1.2$ ,  $c_m/c_s = 1.12$ ,  $T^* = (T - T_0)/(T_i - T_0)$ ,  $T_s^* = 0.6$ ,  $T_l^* = 0.8$ ,  $St = c_s (T_i - T_0)/L$ , 傅立叶数  $t^* = \alpha_s t/X^2$ ,  $\alpha_s$  为固相热扩散系数,  $X$  为特征长度。  $T_i$  表示初始温度,  $T_0$  表示左边界温度。从图 2 可

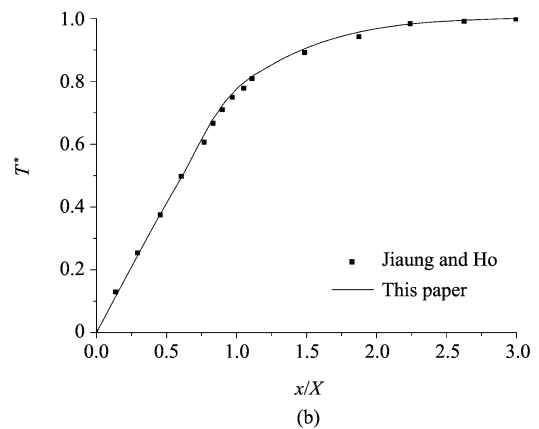
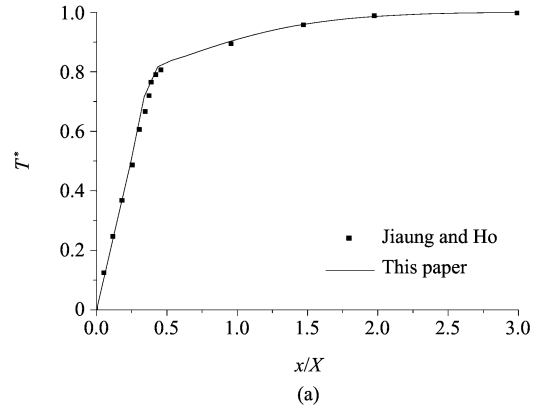


图 2 本文结果与一维解析解的比较 (a)  $St = 0.1$  (b)  $St = 1$   
Fig. 2 Comparison of results of this paper and analytical solution (a)  $St = 0.1$  (b)  $St = 1$

以看出, 本文相变模型的结果与 Jiaung 和 Ho 的一维平板介质分析解吻合的很好, 说明本程序可信。

### 2.2 瞬态红外热辐射与导热耦合换热验证

本文结果与文献 [12] 给出的计算结果进行比较以验证瞬态红外热辐射与导热耦合换热模型的正确性. Mishra 等 [12] 采用格子 Boltzmann 法求解二维瞬态辐射—导热耦合能量方程. 文献 [12] 假设初始温度为  $T_0$ , 在  $t^* > 0$  时, 南侧表面温度为  $T_s = 2T_0$ , 其他侧面温度维持初温不变;  $n = 1$ , 衰减系数  $\beta = 1 \text{ m}^{-1}$ ,  $t^* = \alpha\beta^2 t$ ,  $\Delta t^* = 0.0001$ ,  $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ . 图 3 给出了

导热—辐射参数  $N = (\frac{k\beta}{4\sigma T^3})$  取 0.01 时本文与文献 [12] 结果的比较, 两幅图中从下向上四条曲线的时刻依次为  $t^* = 0.001, 0.005, 0.015, 0.040$ . 本文与文献结果吻合的很好, 说明本程序可信。

从一维相变传热模型及二维瞬态红外热辐射与导热耦合换热模型的验证结果可以看出, 本文的计算模型、计算程序可信。

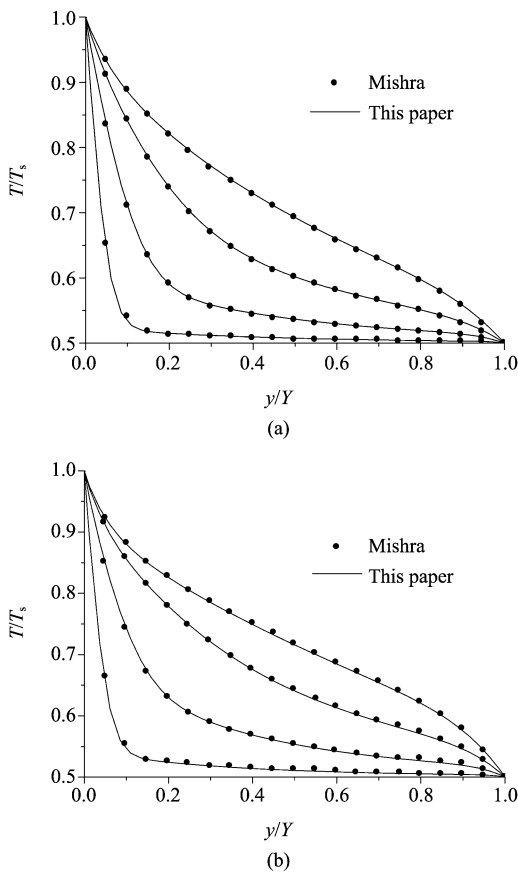


图 3 本文与文献 [12] 的结果比较 (a)  $\omega = 0$  (b)  $\omega = 0.5$   
 Fig. 3 Comparison of this paper and Ref. [12] (a)  $\omega = 0$  (b)  $\omega = 0.5$

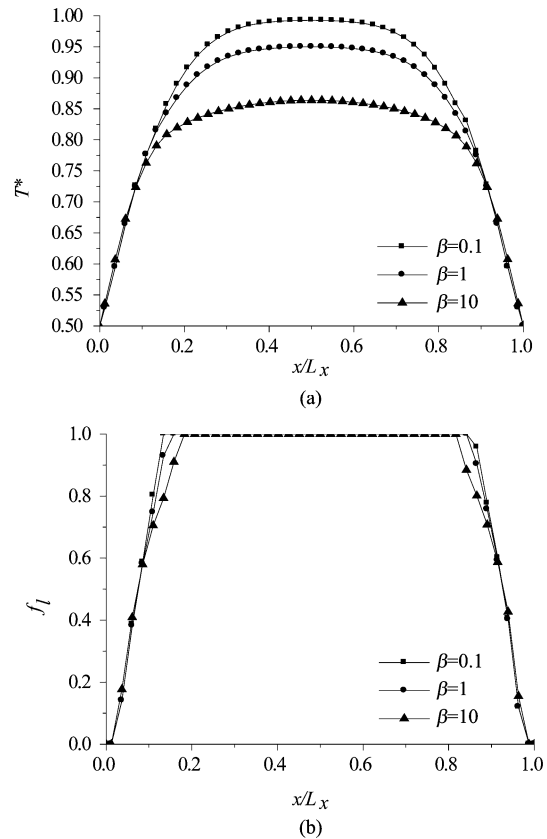


图 4 衰减系数对半透明介质相变传热的影响 (a) 温度分布 (b) 液相率分布  
 Fig. 4 Effects of extinction coefficient on phase-change heat transfer in semitransparent medium (a) temperature distributions (b) liquid fraction distributions

### 3 结果与讨论

凝固过程中参数设置如下: 边界发射率  $\varepsilon = 1$ ; 方腔尺寸为  $L_x = L_y = 0.1 \text{ m}$ . 初始温度  $T_i$  作为参考温度,  $T^* = T/T_i$ . 液相区与糊态区界面处温度为  $T_l^* = 0.8$ , 固相区与糊态区界面处温度为  $T_s^* = 0.6$ . 如不特别说明, 计算参数取  $k_l/k_s = 0.6$ ,  $k_{mz}/k_s = 0.76$ ,  $c_l/c_s = 1.2$ ,  $c_{mz}/c_s = 1.12$ ,  $L = 1000 \text{ J kg}^{-1}$ ,  $\Delta t = 0.001 \text{ s}$ . 蒙特卡洛法中射线数取  $10^7$ . 假设温度和相变不会引起介质折射率的变化, 在糊态区内导热系数和比热均为常数. 下列图中, 所有图给出的都是中线 ( $y/L_y = 0.5$ ) 上的温度或液相率; 各图中计算时间均为  $t = 1 \text{ s}$ ; 除图 4 外, 其它图中衰减系数  $\beta = 10 \text{ m}^{-1}$ ; 除图 6 外, 其它图中  $N = 0.01$ ; 各图均考虑第一类边界条件。

首先讨论辐射参数对红外热辐射与相变耦合换热的影响. 图 4 考虑了衰减系数对温度、液相率分布的影响. 衰减系数的变化对两侧温度较低的区域影响很小, 中部高温区温度随衰减系数增大大幅下降,

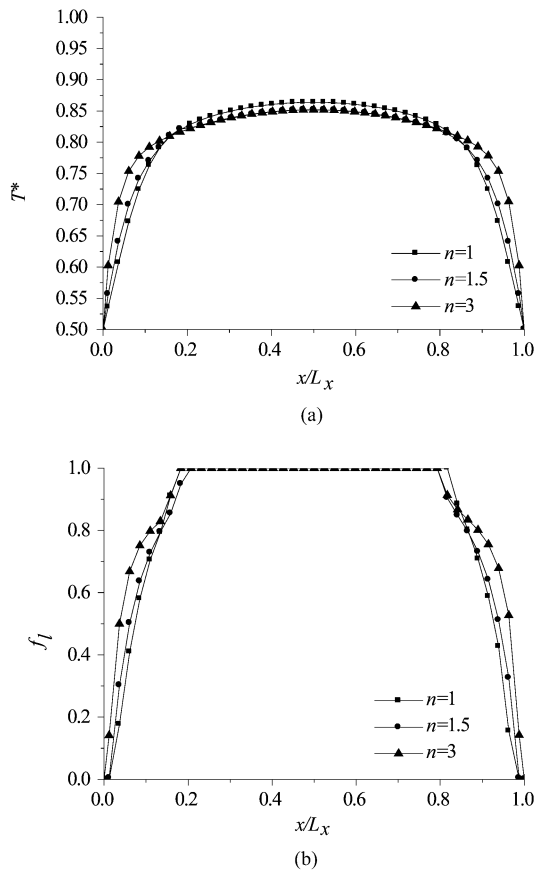


图5 折射率对半透明介质相变传热的影响 (a) 温度分布 (b) 液相率分布

Fig. 5 Effects of refractive index on phase-change heat transfer in semitransparent medium (a) temperature distributions (b) liquid fraction distributions

但液相区范围只是略有减少. 折射率对温度、液相率分布的影响可见图 5. 在凝固过程中折射率增加, 中部温度略有下降, 两侧温度略有上升. 折射率为 3 时两侧肩部温度有明显升高, 糊态区大部分位置液相率比折射率为 1、1.5 时有明显增大. 可以这样定性解释: 折射率越大, 介质本身发射越强, 导致介质中部高温区温度降低, 而两侧低温区由于接收到更多的从高温区发射的能量, 温度升高, 液相区增大.

另外考察了其它相关参数对红外热辐射与相变耦合换热的影响. 从图 6 可以看出, 导热-辐射参数对温度和液相率有较大影响. 导热相对占优时, 温度较低, 甚至没有液相区 ( $N=0.01$ ); 红外热辐射相对占优时, 温度较高. 而且辐射影响很大 ( $N=0.0001$ ) 时温度分布在两侧近壁面处出现一个较大的凸起, 明显的体现出红外热辐射传输的远程性. 潜热对温度、液相率分布的影响如图 7 所示. 在凝固过程中随着潜热的增加, 曲线中部温度变化不大, 但肩部温度升高幅度很大. 尤其是在潜热值  $L=10000\text{J/kg}$  时, 在  $x/L_x$

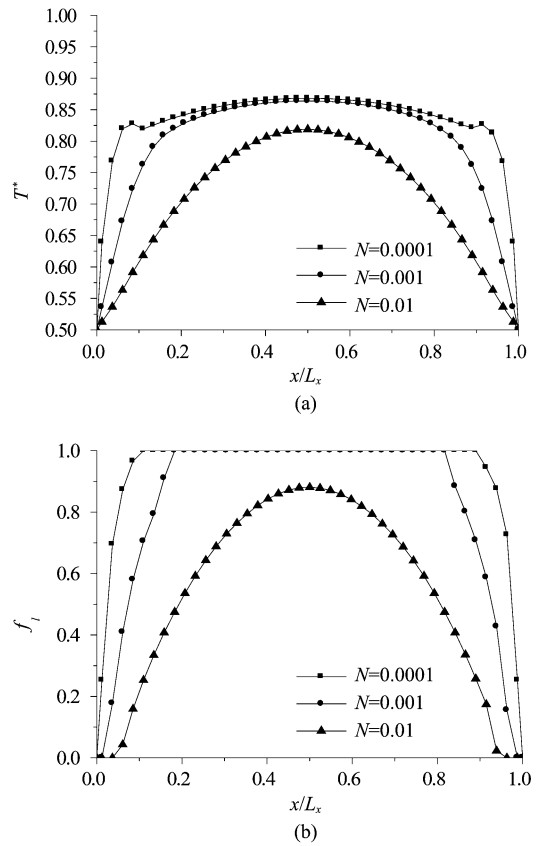


图6 导热-辐射参数对半透明介质相变传热的影响 (a) 温度分布 (b) 液相率分布

Fig. 6 Effects of conduction-radiation parameters on phase-change heat transfer in semitransparent medium (a) temperature distributions (b) liquid fraction distributions

$=0.05, 0.95$  左右温度曲线斜率出现较大变化, 温度曲线有明显凸起. 从图中可以看出, 随着潜热的增大, 液相区变宽, 糊态区变窄.  $L=10000\text{J/kg}$  的液相区明显比  $L=100, 1000\text{J/kg}$  的液相区宽. 这是由于潜热的增大, 释放出更多的能量延缓了介质的凝固过程.

#### 4 结论

本文研究了二维矩形吸收、发射、各向同性散射性半透明介质的凝固传热过程. 采用有限体积法求解基于焓的能量方程, 蒙特卡洛方法求解红外热辐射传输. 一维相变导热、二维瞬态红外热辐射与导热耦合换热的结果与文献进行了比较, 吻合较好, 说明本文建立的红外热辐射与相变耦合换热模型是可靠的. 分析了衰减系数、折射率、导热-辐射参数、潜热等对相变介质内温度、液相率分布的影响. 研究发现, 衰减系数对凝固过程影响较大, 尤其是曲线中部温度随衰减系数增大大幅下降, 但因其是高温区, 液相区分布只是略有减少. 随着折射率的增加, 中部温

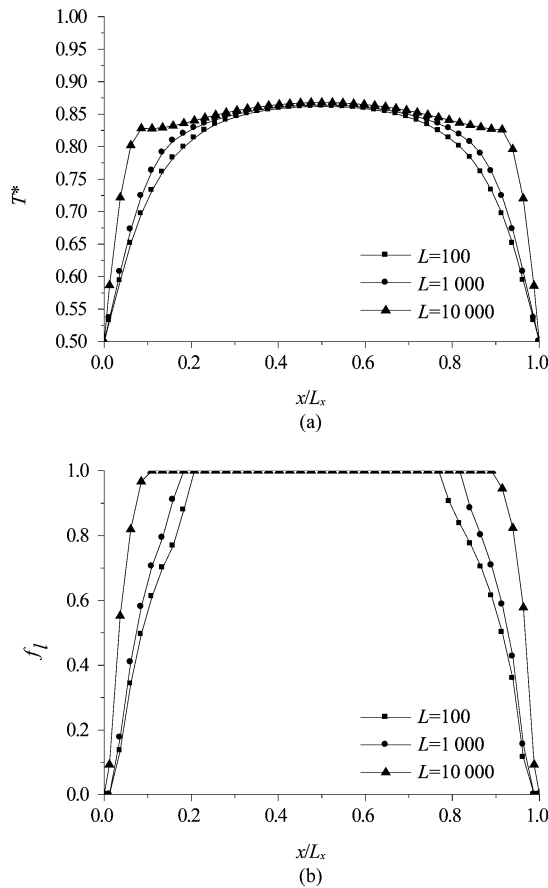


图7 潜热对半透明介质相变传热的影响 (a)温度分布 (b)液相率分布  
 Fig.7 Effects of latent heat on phase-change heat transfer in semitransparent medium (a)temperature distributions (b)liquid fraction distributions

度略有下降,两侧温度上升,糊态区液相率也有明显增大. 导热—辐射参数对温度和液相率均有较大影响:导热占优时,温度下降较快,凝固加速;红外热辐射占优时,温度下降较慢,凝固减缓;当热辐射占绝对优势时,温度分布会在两侧近壁面处出现凸起,明显的体现出红外热辐射传输的远程性.

REFERENCES

[1]Huang Yong, WANG Jun. Thermal emission properties of a two dimensional medium with nonlinear refractive index distribution[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(黄勇,王浚. 二维

非线性梯度折射率介质的热辐射特性研究. *红外与毫米波学报*,2009,28(1):38—41.  
 [2]WAN You-Bao, WU Yu-Rong, ZHANG Jian-Xin, *et al.* Restraining the formation of pyrochlore phase in PZNT ferroelectric film with controlled growth[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(万尤宝,吴宇容,张建新,等. 受控生长方法抑制 PZNT 铁电薄膜中焦绿石相的形成. *红外与毫米波学报*),2008,27(1):35—38,71.  
 [3]Shi Yi-Wei, ZHOU Zhi-Yun TANG Xiao-Li, *et al.* Design and fabrication of infrared hollow fibers for spectroscopic gas sensing[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(石艺尉,周志云,汤晓黎,等. 吸收式气敏传感空芯光纤的设计和制备. *红外与毫米波学报*),2009,28(2):111—114.  
 [4]CHEN Si-Xiang, JIANG Zheng-Feng HU Ye-Fa, *et al.* Pecvd deposition of borophosphosilicate glass used for silica-based planar lightwave circuits[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(陈思乡,江征风,胡业发,等. 硅基 SiO<sub>2</sub> 平面光波导中硼磷硅玻璃覆盖层的制备和研究. *红外与毫米波学报*),2005,24(5):390—393.  
 [5]Prisniakov V F. Gabrinets V A. New conceptions for design of thermal energy storage for solar dynamic plants[J]. *Acta Astronautica*. 1995,37:7—10.  
 [6]LI Jia-Yu, DONG Shi-Kui, HE Zhi-Hong, *et al.* Radiative properties of alumina particles in exhaust plume[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(李佳玉,董士奎,贺志宏,等. 喷焰内氧化铝粒子光辐射特性研究. *红外与毫米波学报*),2007,26(6):469—472.  
 [7]Mishra S C, Behera N C, Garg A K, *et al.* Solidification of a 2-D semitransparent medium using the lattice Boltzmann method and the finite volume method[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*,2008,51:4447—4460.  
 [8]Lapka P, Furmanski P. Numerical modelling of solidification processes of semitransparent materials using the enthalpy and the finite volume methods [J]. *Heat and Mass Transfer*,2008,44:937—957.  
 [9]Shyy W, Udaykumar H S, Rao M M, *et al.* *Computational Fluid Dynamics with Moving Boundaries*[M]. Washington, DC:Taylor & Francis,1996.  
 [10]Ruan L M, Tan H P, Yan Y Y. A Monte Carlo (MC) method applied to the medium with nongray absorbing-emitting-anisotropic scattering particles and gray approximation[J]. *Numer. Heat Transfer, Part A*. 2002,42(3):253—268.  
 [11]Jiaung W S, Ho J R, Kuo C P. Lattice boltzmann method for the heat conduction problem with phase change[J]. *Numer. Heat Transfer, Part B*,2001,39:167—187.  
 [12]Mishra S C, Lankadasu A, Beronov K N. Application of the lattice boltzmann method for solving the energy equation of a 2-d transient conduction-radiation problem[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*,2005,48(17):3648—3659.

关于《红外与毫米波学报》添加 PACS® 代码的通知

从 2011 年起,本刊文章将同时使用中图分类号及美国物理学会物理天文学分类表 PACS 代码区分稿件内容,“PACS®”和“Physics and Astronomy Classification Scheme®”是美国物理学会拥有的注册商标。