

(9) 383-386

反向凝固条件下二元合金一维相变传热的研究*

冯妍卉 张欣欣

王新华 许中波

(北京科技大学热能工程系, 北京 100083)

(北京科技大学冶金工程学院, 北京 100083)

摘要 建立了描述实验条件下反向凝固器中的相变传热过程的一维数学模型, 计算结果与实验数据基本吻合, 分析了反向凝固器内传热特点, 并讨论了母带厚度、钢液过热度等操作参数和凝固率模型、热物性参数等模型参数对新生相生长的影响, 认为凝固器内的停留时间是影响新生相生长的关键因素, 为了防止母带熔断, 停留时间不能超过一极限值, 同时, 凝固率模型和热物性参数对新生相生长的影响不可忽略。

关键词 反向凝固, 凝固, 相变传热, 停留时间, 数值模拟
中图法分类号 TG383 **文献标识码** A

文章编号 0412-1961(2000)04-0383-04

二元合金

TG111.3

INVESTIGATION OF 1-D HEAT TRANSFER WITH PHASE TRANSFORMATION FOR BINERY ALLOY IN CRYSTALLIZOR OF INVERSE CASTING

TK24

FENG Yanhui, ZHANG Xinxin

Department of Energy Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083

WANG Xinhua, XU Zhongbo

College of Metallurgy Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083

Correspondent: ZHANG Xinxin, professor, Tel: (010)62392741,

E-mail: xzhang@public.intercom.com.cn

Manuscript received 1999-12-08, in revised form 2000-01-03

ABSTRACT A one-dimensional continuum model has been developed to describe heat transfer with phase transformation under experimental condition in a crystallizor of inverse casting. The numerical results are proved to be basically agreement with the experimental data. The effects of some main parameters on the solidification behavior have been studied, including operation parameters such as the thickness of mother sheet, the superheat degree of liquid steel and model parameters such as solidification model, thermophysical parameters. The study shows that the residence time is the key parameter having effects on the growth of the new phase and in order to prevent mother sheet from melting down, the residence time shouldn't be longer than a limit value. The effects of solidification model and thermophysical parameters on the formation of the new phase can't be omitted.

KEY WORDS inverse casting, solidification, heat transfer with phase transformation, residence time, numerical simulation

相变传热问题是传热传质领域的重要研究方向之一。近年来, 随着科学和工业技术的发展, 人们对新的材料制备工艺中出现的相变问题越来越感兴趣, 如激光表面处理技术、热喷涂技术和反向凝固技术等等^[1], 反向凝固技术是钢铁工业近终型连铸技术的一种, 是成本低、效益高、可生产复合钢材的新工艺, 热物理问题的研究是其

工艺开发、研究的基础之一。一定厚度、一定温度的母带, 以一定的速度从盛满钢水的反向凝固器内自下而上通过, 母带表面附近的钢水迅速冷却凝固, 粘附在母带表面形成新生相, 新生相截面上的温度分布与传统连铸凝固过程的相反, 中心温度低, 表面温度高, 故称为反向凝固。当母带与新生相离开反向凝固器时, 其表面处于半凝固状态, 经凝固器上部的轧辊进行初轧, 再经过冷热连轧可获得表面平整、厚度误差小于 2% 的连铸薄带。工艺实验研究是把固定在夹持器上的一定厚度和一定温度的母带浸入到模拟反向凝固器的感应炉内的钢液中, 到达预定时间后取出, 测量其厚度。若不考虑母带浸入和取出的时间及其对

* 国家自然科学基金重点资助项目 59634130

收到初稿日期: 1999-12-08, 收到修改稿日期: 2000-01-03

作者简介: 冯妍卉, 女, 1974年生, 博士生

钢液的扰动, 则此实验中新生相生长规律的实验研究装置可简化为初始温度不均匀的一维非稳态导热相变问题, 参见图 1. 低温母带是产生相变的唯一冷源. 钢的相变问题一般归结为 Fe-C 二元合金的相变.

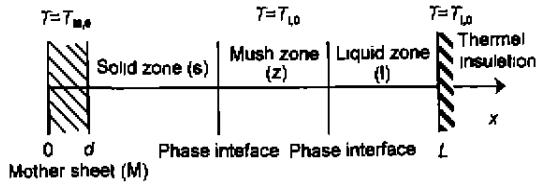


图 1 二元合金相变一维物理模型

Fig.1 One-dimensional physical model of binary alloy with phase transformation

1 相变传热系统的数学描述

设母带的厚度 $2d$ 为 2 mm, 初始温度 $T_{m,0}$ 为 25 °C; 凝固器宽度 $2L$ 为 180 mm; 凝固器壁绝热, 初始温度为 1530 °C; 液态金属初始温度 $T_{l,0}$ 也为 1530 °C. 考虑到对称性, 仅研究系统的半个区域. 在图 1 所示的坐标系内, 能量守恒方程可以焓和温度两种形式表达.

1.1 焓式

定义混合焓 $h = cT + f_l h_f$, 则能量守恒方程焓式表达为

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{\kappa}{c} \nabla h \right) + \nabla \cdot \left[\frac{\kappa}{c} \nabla (cT - h) \right] \quad (1)$$

两相区内的混合密度 ρ , 混合比热容 c 和混合导热系数 κ 可表达为 [2,3]

$$1/\rho = f_s/\rho_s + f_l/\rho_l \quad (1a)$$

$$c = f_s c_s + f_l c_l \quad (1b)$$

$$\kappa = \kappa_l f_l \rho / \rho_l + \kappa_s f_s \rho / \rho_s \quad (1c)$$

式中, 下标 s 和 l 分别表示固相和液相; f_s 和 f_l 分别为固相率和液相率; h_f 为相变物质的潜热. 定解条件如下

初始条件 ($t=0$) 时

母带

$$0 \leq x \leq d, \quad h(x, t) = cT_{M,0} \quad (2a)$$

钢液

$$d < x \leq L, \quad h(x, t) = cT_{l,0} + h_f \quad (2b)$$

边界条件 ($t > 0$) 时

对称中心

$$x = 0, \quad \partial h / \partial x = 0 \quad (2c)$$

固壁

$$x = L, \quad \partial h / \partial x = 0 \quad (2d)$$

1.2 温度式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c T) = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) - h_f \frac{\partial}{\partial t} (\rho f_l) \quad (3)$$

采用修正比热法, 则式 (3) 可表达为

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\rho c + h_f \frac{\partial(\rho f_l)}{\partial T} \right) T \right] = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) \quad (4)$$

初始条件 ($t=0$) 时

母带

$$0 \leq x \leq d, \quad T(x, t) = T_{M,0} \quad (5a)$$

钢液

$$d < x \leq L, \quad T(x, t) = T_{l,0} \quad (5b)$$

边界条件 ($t > 0$)

对称中心

$$x = 0, \quad \partial T / \partial x = 0 \quad (5c)$$

固壁

$$x = L, \quad \partial T / \partial x = 0 \quad (5d)$$

2 凝固率模型

液相率 f_l (固相率 f_s) 的计算方案主要有如下几种 [4]:

模型 1: 假设温度 T 与 f_s 成线性关系 (即液相线和固相线设为平行的两条直线)

$$f_s = (T_l - T) / (T_l - T_s) \quad (6a)$$

模型 2: 假设 T 为 f_s 的二次函数

$$f_s = \sqrt{(T_l - T) / (T_l - T_s)} \quad (6b)$$

模型 3: 假设 T 为 f_l 的二次函数

$$f_l = \sqrt{(T - T_s) / (T_l - T_s)} \quad (6c)$$

模型 4: 由溶质再分配方程计算, 根据图 2 所示的平衡相图进行计算的平衡式为

$$f_s = \frac{1}{1 - k_p} \frac{T - T_{liq}}{T - T_m} \quad (6d)$$

上述各式中, $k_p = f_s^\alpha / f_l^\alpha$, 为平衡率或平衡分配系

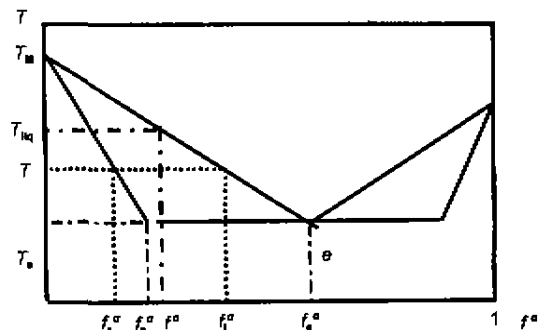


图 2 Fe-C 二元合金相图

Fig.2 Equilibrium phase diagram of Fe-C binary alloy

数,可直接由相图计算得到,因为液相线和固相线的曲率一般很低,可近似看成直线; T_l 和 T_s 分别为液相线和固相线温度; T 为局域温度; T_m 为 $f^\alpha \rightarrow 0$ 时的熔化温度; T_{liq} 为相应于 f^α 的液相线温度, $T_{liq}=T_m+(T_e-T_m)f^\alpha/f_e^\alpha$,下标 e 为共晶点; f^α 是成分为 α 的混合浓度; f_s^α 和 f_l^α 分别是成分为 α 的固、液相浓度。

3 计算结果讨论和验证

3.1 基准情况数值模拟结果的分析讨论

取母带与钢液为 A3 碳钢,假设固、液相区物性参数为常数且相等,具体数值如下:固、液相线温度 T_s 和 T_l 分别为 1485 和 1510 $^\circ\text{C}$ 、密度 ρ 为 7600 kg/m^3 、导热系数 κ 为 28 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、比热容 c 为 650 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、潜热 h 为 247 kJ/kg 、凝固率模型采用式 (6a);由焓式模型式 (2)、修正比热温度模型式 (4) 进行数值求解,可得到如图 3 所示的结果,从图中可以看出,焓模型与温度模型的数值模拟结果均与实验数据吻合较好,表现出了与实验结果 [5] 一致的新生相生长规律,但两个模型彼此间稍有差别。计算表明,新生相生长可以分为三个阶段。第一阶段:低温母带插入到高于液相线温度的钢液中,由于温度梯度较大,母带与钢液间迅速发生导热传导;母带周围的钢液放热降温,当温度低于液相线温度时,钢液在母带表面形成两相区;当温度低于固相线温度时,钢液在母带表面凝固,形成凝固壳。在这一阶段,凝固壳厚度随时间增长得很快。第二阶段:母带迅速升温,与周围钢液的温度梯度减小,凝固速度减慢;当与周围钢液温度基本相同时,凝固现象停止。第三阶段:母带与新生相不断升温,当温度超过固相线温度时开始熔化,厚度减小,直至母带熔断。由于系统的对称性,图 3 中纵坐标仅表示母带和新生相厚度的一半(图 4—7 与此相同)。从数值结果可以看出,利用 2 mm 厚的母带,欲得到厚度约为 12 mm 的薄带时,时间大约不能超过 3 s。

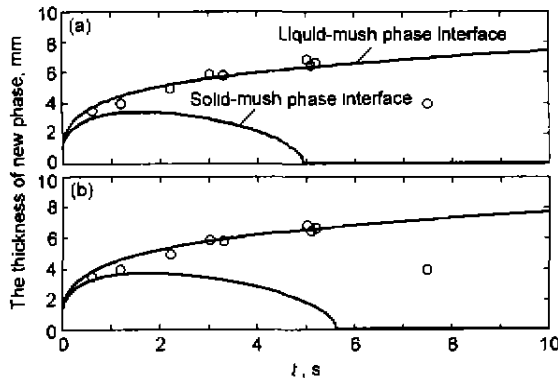


图 3 焓式和温度式模型新生相厚度随时间的变化
Fig.3 The change of new phase thickness with time
o experimental data — calculation value
(a) enthalpy model (b) temperature model

3.2 模型参数的影响分析

3.2.1 母带厚度 图 4 为钢液过热度为 20 $^\circ\text{C}$ 时,不同厚度母带浸入钢液后,所得薄带厚度随时间的变化。可以看到,厚度为 0.8 mm(图 4a)的母带浸入钢液 0.5 s 后即开始熔化,实际生产过程中不易控制。厚度为 1.5 和 2 mm(图 4b,c)的母带分别浸入钢液 1.4 和 2 s 后,凝固壳开始熔化,凝固壳的最大厚度分别为 5.7 和 7.4 mm,能够满足热轧薄带的厚度要求。

3.2.2 钢液过热度 图 5 为厚 1.5 mm 的母带在不同钢液过热度 ΔT 时新生相厚度随浸入时间的变化,可以看出 ΔT 对新生相厚度和母带熔断时间的影响。当

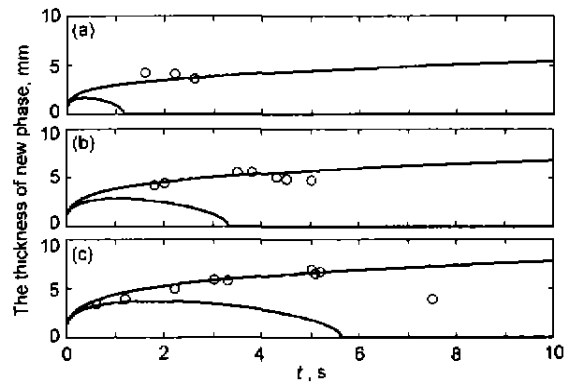


图 4 母带厚度对新生相生长的影响
Fig.4 The effect of mother sheet thickness on the growth of new phase
o experimental data — calculation value
(a) 2d=0.8 mm (b) 2d=1.5 mm (c) 2d=2 mm

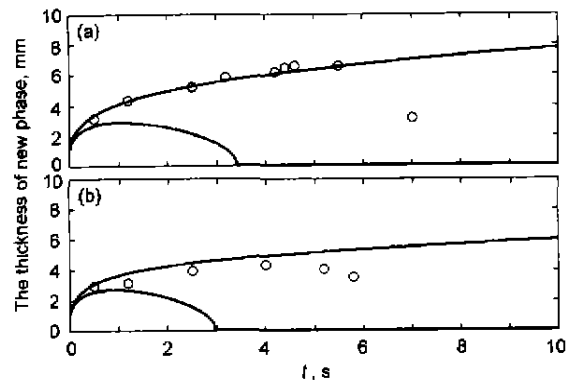


图 5 钢液过热度对新生相生长的影响
Fig.5 The effect of superheat degree of liquid steel on the growth of new phase
o experimental data — calculation value
(a) $\Delta T=10^\circ\text{C}$ (b) $\Delta T=30^\circ\text{C}$

ΔT 由 10 $^\circ\text{C}$ 增至 30 $^\circ\text{C}$,凝固壳最大厚度由 5.8 mm 减至 5.4 mm。 ΔT 为 10 $^\circ\text{C}$ 时,母带浸入钢液约 3.4 s 后熔断;当 ΔT 增至 30 $^\circ\text{C}$ 时,母带浸入 3 s 后即熔断。

3.3 凝固率模型和物性参数的影响分析

3.3.1 凝固率模型 图 6 显示了钢液过热度为

20 ℃, 母带厚度为 2 mm 的条件下采用不同凝固率模型进行模拟, 薄带厚度随浸入时间的变化. 对第 4 种凝固率模型 (6d) 式, 取 $T_m=1538\text{ }^\circ\text{C}$, $k_p=0.17$, $T_{liq}=1510\text{ }^\circ\text{C}$. 从图可以看出, 凝固率模型 1, 2 的计算结果比较接近, 且最接近实验结果.

3.3.2 物性条件 取母带厚度为 2 mm, 钢液初始温度为 1530 ℃, 钢种为 A3 碳钢. 物性参数随温度变化, 可得到如图 7 所示的结果. 可以看出, 各实验数据点

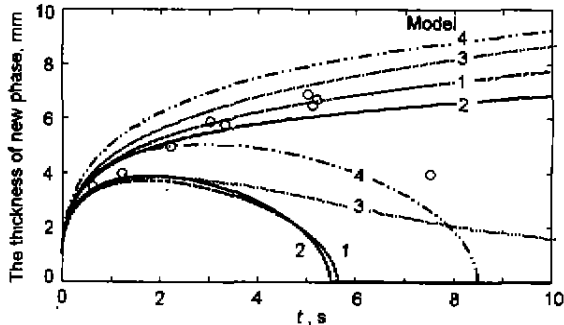


图 6 凝固率模型对新生相生长模拟计算的影响

Fig.6 The effect of phase mass fraction on numerical simulation of new phase growth
○ experimental data — calculation value

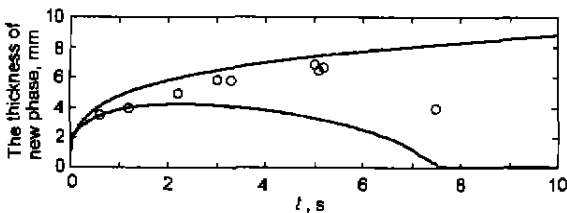


图 7 变物性条件下新生相厚度随时间的变化

Fig.7 The instantaneous change of new phase thickness with inconstant thermophysical parameters
○ experimental data — calculation value

的值均略小于计算结果, 从实验的操作过程来看, 这是合理的. 因为在实验中, 当子带被从凝固器中抽取时, 子带表面的糊状区在重力作用和钢液扰动作用下, 势必有部分质量损失, 若把这部分损失计入, 此数值模拟计算结果与第 3.1 节的基准情况计算结果相比, 应该与实验数据吻合得更好. 凝固壳从 2.6 s 开始熔化, 约 7.5 s 后发生熔断, 凝固壳最大厚度约为 8.4 mm.

4 结论

建立了描述实验条件下反向凝固器中的相变传热过程的一维数学模型.

计算分析了反向凝固器内传热特点, 并讨论了母带厚度、钢液过热度等操作参数和凝固率模型、热物性参数等模型参数对新生相生长的影响. 认为凝固器内的停留时间是影响新生相生长的关键因素. 为了防止母带熔断, 停留时间不能超过一极限值.

参考文献

- [1] Pleschiutchnigg F P, Hagen I V, Gammal T E I. *Stahl Eisen*, 1994; 114(2): 47
- [2] Bennon W D, Incropera F P. *Int J Heat Mass Transfer*, 1987; 30: 2161
- [3] Bennon W D, Incropera F P. *Numer Heat Transfer*, 1988; 13: 277
- [4] Zhang Y Z, Ai L Q. *Analytical Resolving and Numerical Simulation of Ferrous Metallurgical Process*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997: 296
(张玉柱, 艾立群. 钢铁冶金过程的数学解析与模拟. 北京: 冶金工业出版社, 1997: 296)
- [5] University of Science and Technology Beijing, Northeastern University. *Report on Fundamental Investigation of Inverse Casting Technique for Producing Thin Steel Strip*, Sponsored by National Natural Science Foundation of China, No.59634130, Beijing, 1999
(北京科技大学, 东北大学. 国家自然科学基金重点项目“反向凝固法生产薄带技术基础研究”(59634130)1999 年度报告, 北京, 1999)