

# 热型连铸凝固过程微观组织形成的数值模拟

丁雨田 许广济 王海南 张琴豫

(兰州理工大学)

**摘要** 采用宏观-微观耦合的方法,建立了宏-微观统一的数学物理模型-直接差分(Direct Difference)-元胞自动控制(Cellular Automaton)模型,即CA-DD模型,模拟了热型连铸过程中晶粒的竞争生长过程,并研究了不同工艺参数对固-液界面形状及晶粒竞争生长的影响。模拟结果表明,采用宏-微观耦合的方法模拟热型连铸过程中微观组织的演化过程以及各种工艺参数对组织形成的影响是有效、可行的。

**关键词** 热型连铸; 微观组织; Cellular Automaton; 数值模拟

**中图分类号** TG249.7; TP311 **文献标志码** A **文章编号** 1001-2249(2005)12-0707-05

采用计算机微观数值模拟技术,在晶粒尺度上对热型连铸凝固过程中的微观组织形成及演化过程模拟,同时与宏观温度场模拟相结合,可以全面反映热型连铸晶粒的演化过程以及各工艺参数对晶粒演化的影响。目前用于铸件凝固过程微观组织模拟的基本方法,主要有确定性模型、Monte Carlo(MC)方法、Cellular Automaton(CA)方法、相场法。

Monte Carlo方法(MC方法)<sup>[1~3]</sup>以概率统计理论为其主要理论基础,以随机抽样为其主要手段。在处理形核和生长过程中引入概率函数,模拟凝固过程中的一些随机现象。利用Monte Carlo方法可以产生与实际相近的微观组织,但是Monte Carlo方法没有考虑结晶学取向,缺乏生长动力学基础。同Monte Carlo方法相比,

Cellular Automaton方法<sup>[4~6]</sup>考虑了晶体生长取向和枝晶尖端的生长动力学,物理意义明确。Cellular Automaton模型适用于模拟柱状晶组织的形成、柱状区晶粒的竞争生长以及ECT(等轴-柱状)转变和CET(柱状-等轴)转变。

热型连铸过程组织演化的试验研究表明<sup>[7]</sup>,在热型连铸凝固过程中,组织的演化经历了晶粒迅速淘汰阶段、柱状晶竞争生长阶段和单晶生长阶段。因此热型连铸微观组织模拟就是要再现这3个阶段。本课题针对纯金属Cu的热型连铸过程,将宏观温度场模拟和CA方法模拟耦合,建立热型连铸凝固过程微观组织模拟的宏-微观耦合模型<sup>[8,9]</sup>,并模拟研究热型连铸凝固过程微观组织的演化过程。

收稿日期: 2005-07-19

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目(ZS981-A22-055-C)

第一作者简介: 丁雨田,男,1962年出生,教授,兰州理工大学材料科学与工程学院,兰州(730050),电话:0931-2976038, E-mail: dingyt@lut.cn

## 参 考 文 献

- 王正品,张路,要玉宏. 金属功能材料. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- Klement W, Willers R H, Duwez P. Non-crystalline Structure in Solidified Gold-silicon Alloys. *Nature*, 1960, 187(4740): 869~873
- Inoue A, Kohinata M, Tsai A P. Mg-Ni-La Amorphous Alloys with a Wide Supercooled Liquid Region. *Mater. Trans. JIM*, 1989, 30: 378~382
- Inoue A, Zhang T, Masumoto T. Glass-forming Ability of Alloys. *J. Non-cryst. Solids*, 1993(156~158): 473~480
- 陈伟荣,王英敏,董闯等. 吸铸法制备Zr-Al-Ni-Cu-Mo大块非晶合金. *热加工工艺*, 2001(6): 25~26
- 李颖裴,马学鸣,汪卫华等. 新型Zr-Nb基大块非晶合金的形成及性能. *材料科学与工程*, 2000(3): 39~42
- Yokoyama Y, Inoue A. Solidification Condition of Bulk Glassy  $Zr_{60}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}Pb_5$  Alloy by Unidirectional Arc Melting. *Mater. Trans. JIM*, 1995, 36: 1398~1401
- 边赞,何国,陈国良. Zr基大块非晶的研究. *北京科技大学学报*, 2002(3): 219~222
- 门华,徐坚. Mg-Cu-Zr-Y块体金属玻璃的形成. *金属学报*, 2001(12): 1243~1246
- Paker A, Johnson W L. A Highly Processable Metallic Glass;  $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10.0}Be_{22.5}$ . *Appl. Phys. Lett.*, 1993, 63, 2342~2344
- Inoue A, Nishiyama N, Amiya K et al. Ti-based Amorphous Alloys with a

Wide Supercooled Liquid Region. *Mater. Lett.*, 1994, 19: 131~135

- Inoue A, Gook J S. Fe-based Ferromagnetic Glassy Alloys with Wide Supercooled Liquid Region. *Mater. Trans. JIM*, 1995, 36: 1180~1183
- Inoue A, Katuya A. Multicomponent Co-based Amorphous Alloys with Wide Supercooled Liquid Region. *Mater. Trans. JIM*, 1996, 37: 1332~1336
- Wang X M, Yoshii I, Inoue A. Bulk Amorphous Co-Ni-Based Alloys with a Large Supercooled Liquid Region. *Mater. Trans. JIM*, 2000, 41: 539~546
- Lin X H, Johnson W L. Formation of Ti-Zr-Cu-Ni Bulk Metallic Glasses. *J. Appl. Phys.*, 1995, 78(11): 6514~6519
- Bae D H, Lim H K, Kim S H. Mechanical Behavior of a Bulk Cu-Ti-Zr-Ni-Si-Sn Metallic Glass Forming Nano-crystal Aggregate Bands During Deforming in the Supercooled Liquid Region. *Acta. Mater.*, 2002, 50: 1749~1759
- Calin M, Eckert J, Schultz L. Improved Mechanical Behavior of Cu-Ti-based Bulk Metallic Glass by in Situ Forming of Nanoscale Precipitates. *Scripta Mater.*, 2003, 48: 653~658
- 孔见,陈光.  $Cu_{47}Ti_{34}Zr_{11}Ni_8$ 块体非晶合金的制备. *特种铸造及有色合金*, 2003(6): 11~13
- Geer A L. Confusion by Design. *Nature*, 1993, 366: 303~306
- 李维火,肖学山,夏雷等. 机械合金化法制备Al-Ni-La-Cu非晶合金. *上海大学学报(自然科学版)*, 2002, 8(5): 420~422
- 寇生中,冯柳,丁雨田等. 高强度Cu基块状非晶合金的最新研究进展. *材料导报*, 2003, 17: 242~245

(编辑: 刘卫)

# 1 微观组织形成的物理数学模型

## 1.1 温度场模拟的数学模型

在横引式热型连铸过程中, 随着铸棒以速度  $v_c$  水平拉铸, 液态金属不断补充, 因此热能是靠传导和流体本身的运动两者来传递的。通常可以忽略液态金属本身因流动而造成的对流换热, 而把液相和固相区作为一个整体以速度  $v_c$  水平移动, 在这种情况下, 则可以得到圆柱坐标系下热型连铸过程的热传输方程。

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho c_p v_c \frac{\partial T}{\partial z} + q \quad (1)$$

式中,  $q$  为潜热,  $c_p$  为比热容,  $\rho$  为密度,  $\lambda$  为导热系数,  $v_c$  为连铸速度,  $T$  为温度,  $r$  为圆柱体半径。

横引式热型连铸过程中在液态金属凝固的同时还伴随其连续的水平运动, 因此热量传输不仅包含热传导引起的热量变化, 而且由于液态金属不断注入横引管, 还包括金属液质量变化引起的热量变化。后者的存在使热型连铸过程温度场是一个定向不断变化的温度场, 其数学模型表现为包含速度项, 模拟计算时表现为计算区域的连续变化。这一速度项的存在使基本方程引入了温度的一次偏微分项而成为非稳态非齐次热传输方程, 直接求解比较困难。

采用单元水平移动模型对方程进行简化。即  $\Delta t$  内采用非稳态热传导方程计算空间温度场分布, 然后单元整体水平移动  $v_c \cdot \Delta t$  距离, 进行液态金属变化导致的热量重新分布计算, 水平移动的空间  $v_c \cdot \Delta t$  则以注入的金属液充满。两个过程交替进行, 就可以实现对热型连铸过程不断变化的温度场的描述。当  $\Delta t$  足够小时, 以铸速  $v_c$  匀速水平移动的铸棒被近似认为这种间歇式的运动是合理的<sup>[10]</sup>。采用能量平衡法建立差分方程。铸棒单元剖分示意图见图 1, 针对  $(i, j)$  节点存在以下热平衡关系:

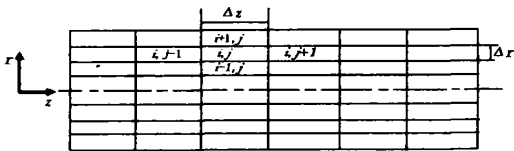


图 1 铸棒单元剖分示意图

$$\begin{aligned} \rho c_p 2\pi i (\Delta r)^2 \Delta z (T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t) = & \frac{\lambda 2\pi i (\Delta r) (T_{i,j+1}^t - T_{i,j}^t) \Delta t}{\Delta z} + \\ & \frac{\lambda 2\pi i (\Delta r)^2 (T_{i,j-1}^t - T_{i,j}^t) \Delta t}{\Delta z} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda 2\pi (i+1) \Delta r \Delta z (T_{i+1,j}^t - T_{i,j}^t) \Delta t}{\Delta r} + \\ & \frac{\lambda 2\pi (i-1) \Delta r \Delta z (T_{i-1,j}^t - T_{i,j}^t) \Delta t}{\Delta r} \quad (2) \end{aligned}$$

整理得:

$$\begin{aligned} T_{i,j}^{t+\Delta t} = & T_{i,j}^t + \frac{\lambda \cdot \Delta t}{\rho c_p \Delta z^2} (T_{i,j-1}^t - T_{i,j}^t) + \\ & \frac{\lambda \cdot \Delta t}{\rho c_p \Delta z^2} (T_{i,j+1}^t - T_{i,j}^t) + \\ & \frac{(i-1) \lambda \cdot \Delta t}{i \rho c_p \Delta r^2} (T_{i-1,j}^t - T_{i,j}^t) + \\ & \frac{(i+1) \lambda \cdot \Delta t}{i \rho c_p \Delta r^2} (T_{i+1,j}^t - T_{i,j}^t) \quad (3) \end{aligned}$$

采用正逆序计算得到的温度分别为  $T_{1,i,j}^{t+\Delta t}$  和  $T_{2,i,j}^{t+\Delta t}$ , 则有

$$T_{i,j}^{t+\Delta t} = \frac{T_{1,i,j}^{t+\Delta t} + T_{2,i,j}^{t+\Delta t}}{2} \quad (4)$$

式(4)即为显式交替差分方程。

## 1.2 形核模型

采用 Rappaz, Thevoz<sup>[11, 12]</sup> 等人根据 Oldfield<sup>[13]</sup> 理论提出的准瞬时连续形核模型。在某一给定的过冷度下晶粒密度  $n(\Delta T)$  可以通过对此分布积分求得:

$$n(\Delta T) = \int_0^{\Delta T} \frac{dn}{d\Delta T} d(\Delta T) \quad (5)$$

## 1.3 生长模型

### 1.3.1 枝晶生长动力学

在热型连铸凝固过程中, 微观组织由在引晶棒(激冷面)上的等轴晶和沿连铸方向的柱状晶组织组成。对等轴晶, 枝晶尖端生长速度采用 Lipton<sup>[14]</sup> 等人提出的 IGK 模型计算。对于由热扩散控制的等轴晶尖端生长(纯金属)来说, 如果假定枝晶端部为圆柱体, 则有:

$$P_t = \Omega_t = - \frac{\Delta T_t \cdot c_p}{\Delta H} \quad (6)$$

式中,  $P_t$  为热的 Peclet 数,  $P_t = RV / (2\alpha)$ ,  $R$  为枝晶尖端的曲率半径,  $V$  为枝晶尖端的生长速度,  $\Delta H$  为熔化潜热,  $c_p$  为比热容,  $\Delta T_t$  为枝晶尖端液相过冷度,  $\alpha$  为热扩散率。

$V$  和  $R$  在  $\Omega_t$  一定的条件下成反比关系, 但  $R$  值只能在某一定值的条件下枝晶才能生长。Langer<sup>[15]</sup> 等人根据界面稳定性动力学理论认为,  $R$  大约等于枝晶端部最小扰动波长  $\lambda$  时, 枝晶才能稳定生长, 对合金而言:

$$R = \lambda = \left( \frac{\Gamma}{\sigma^* (mG_c - G)} \right)^{1/2} \quad (7)$$

式中,  $\sigma^*$  是一常数, 其值约为 0.025,  $\Gamma$  是 Gibbs-Thomson 自由能,  $m$  是合金相图中液相线斜率,  $\bar{G}$  是枝晶端部的溶质浓度梯度。

$$\bar{G} = \frac{\lambda_s G_s + \lambda_L G_L}{\lambda_s + \lambda_L} \quad (8)$$

式中,  $\lambda_L$ ,  $\lambda_s$  为液相-固相的导热系数;  $G_L$ ,  $G_s$  为液相、固相的温度梯度。

对固相, 假定为等温,  $G_s=0$ , 同时假定固、液相导热系数相同, 对纯金属, 枝晶端部的溶质浓度梯度  $G_c=0$ , 最终推导得到纯金属在负温度梯度下枝晶尖端生长速度的表达式为:

$$V = 2 \frac{\sigma^* \alpha c_p}{\Gamma \Delta H} \Delta T_i^2 \quad (9)$$

柱状晶端部在正温度梯度下生长时, 生长速度  $V$  可用式(10)表示:

$$V = \frac{\lambda_L G_L - \lambda_s G_s}{\rho \Delta H} \quad (10)$$

实际模拟计算时, 如果晶粒端部的温度梯度为负, 说明是纯金属按等轴枝晶方式生长, 则用式(9)计算晶体生长速度; 如果温度梯度为正, 说明是纯金属柱状晶生长, 则用式(10)计算生长速度。

### 1.3.2 枝晶生长方向

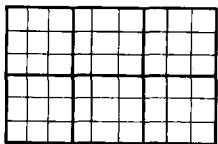
对方晶系金属, 其择优生长方向为  $\langle 100 \rangle$  晶向。对于二维 CA 方法来说, 只考虑  $\langle 10 \rangle$  和  $\langle 01 \rangle$  两个方向。假设在液相内部成形壁处形核的晶粒具有随机的结晶方向, 形核的晶核的生长方向位于  $[\theta, \theta + d\theta]$  内的概率为:

$$dp(\theta) = \frac{2}{\pi} d\theta \quad (11)$$

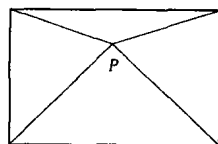
## 2 微观组织形成的数值计算方法

### 2.1 网格划分和微观单元温度确定

温度场模拟和微观组织模拟采用不同的网格划分。用较粗的网格来计算宏观温度场, 在此网格内划分更细的网格来模拟微观组织, 计算单元见图2(外围粗实线所示为宏观温度场计算单元, 内部用细实线剖分的单元为微观模拟计算单元)。由于微观单元很细, 其尺度为  $\mu\text{m}$  数量级, 如果其温度也通过传热计算得到, 将会耗费大量的时间, 因此采用插值求解 CA 单元的温度, 显然, CA 单元的温度受其周围的宏观单元的温度影响, 各 CA 单元的温度与该点到其周围宏观单元的距离  $l_i$  成反比, 即:



(a) 宏观单元与CA单元



(b) CA单元的温度计算模型

图2 宏观单元与微观 CA 单元之间的关系

$$T_p = \sum_{i=1}^4 l_i^{-1} T_i / \sum_{i=1}^4 l_i^{-1} \quad (12)$$

式中,  $T_p$  为 CA 单元的温度,  $T_i$  为  $P$  点周围宏观单元温度,  $l_i$  为  $P$  点到宏观节点的距离。

### 2.2 形核与长大

在每一时间步长内, 随着温度的降低, 过冷度  $\bar{q}(\Delta T)$  增加, 晶粒密度  $\bar{\delta}$  增加为:

$$\bar{\delta} = n[\Delta T + \bar{q}(\Delta T)] - n(\Delta T) = \int_{\Delta T}^{\Delta T + d(\Delta T)} \frac{dn}{d\Delta T} d(\Delta T) \quad (13)$$

$\bar{\delta}$  与铸件体积的乘积即为一时间步长内的形核数  $\bar{\delta}$ , 这些新晶粒位置的选择, 是根据在时间步长内网格单元形核的概率  $p_n$  来随机决定的。

扫描所有的网格单元, 如果该单元为液态(其状态值为零), 计算其  $p_n$  值, 并与一随机数  $n(0 \leq n \leq 1)$  比较, 如果  $p_n > n$ , 此单元形核凝固, 其状态值赋予一大于零的整数(1~49), 表示枝晶优先生长方向。传统的 CA 方法由于在模拟过程中, 晶粒偏离了原始晶向, 所以需要在每一时间步长内对枝晶尖端生长方向进行校正。为了解决生长中的枝晶尖端校正问题, 采用 Gandin 等<sup>[6]</sup> 提出的改进二维 CA 模型处理晶粒的生长。

## 3 模拟结果与分析

针对铸棒直径为 6 mm 的纯金属 Cu 进行微观组织形成的模拟。模拟中, 微观模拟区域按每毫米 60 个网格剖分为正方形单元, 网格厚度取为  $1.5 \times 10^{-16} \text{ m}$ , 模拟分辨率大约为 15  $\mu\text{m}$ , 该值同二次枝晶臂间距是一个数量级, 因此可以很好地模拟通过分枝机理晶粒的生长。微观模拟程序包括单元剖分、形核处理、生长处理以及晶粒显示等 4 个模块, 采用 Borland C++ Builder 编制。

当连铸速度为 20 mm/min, 铸型温度为 1 363 K, 熔体温度为 1 423 K, 冷却水温度为 20  $^{\circ}\text{C}$ , 冷却水流量为 0.4 mm/min, 冷却距离为 30 mm, 凝固时间为 9 s 时的温度场模拟计算结果如图3 a所示, 图3 b为微观模拟结果。可以看出, 由宏观温度场计算得到的固液界面形状与微观模拟结果是一致的, 但形状不完全一致, 而且宏观界面位置要比微观界面位置超前一段距离, 这是因为宏观界面位置表示的是液相线的位置, 而枝晶尖端的生长速度与过冷度的平方成正比。热型连铸凝固过程固-液界面的演变过程见图4, 在凝固初期晶粒为迅速淘汰阶段, 固-液界面为平界面。进入缓慢淘汰阶段后, 固液界面由平界面变为凸界面。从图4中可以看出, 晶粒

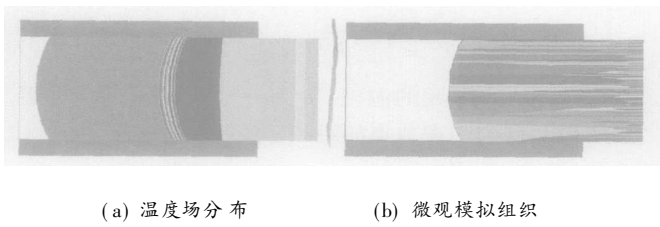


图 3 宏-微观耦合温度场模拟结果

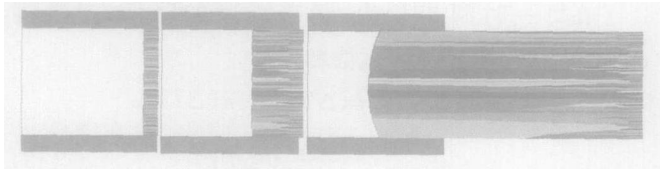


图 4 热型连铸的组织演化过程

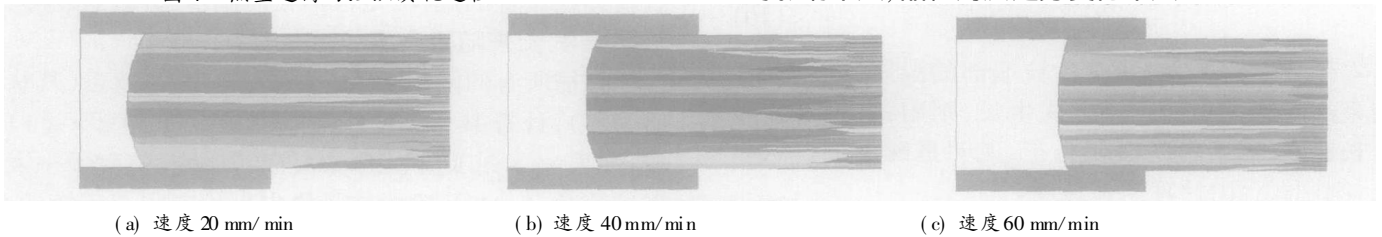


图 5 不同连铸速度下的模拟组织

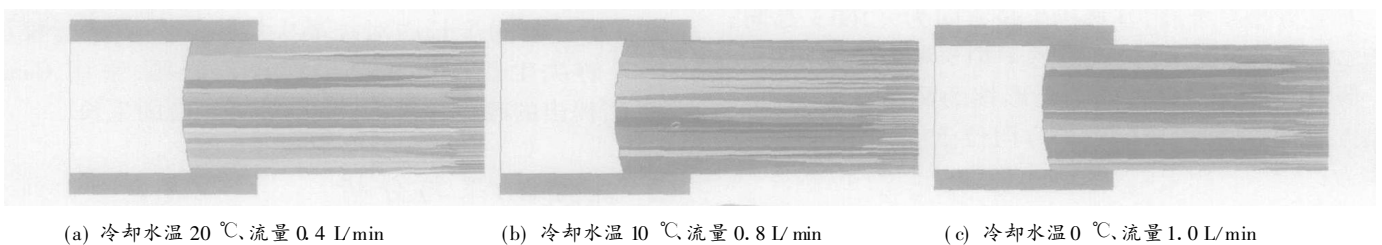


图 6 不同冷却条件下的模拟组织

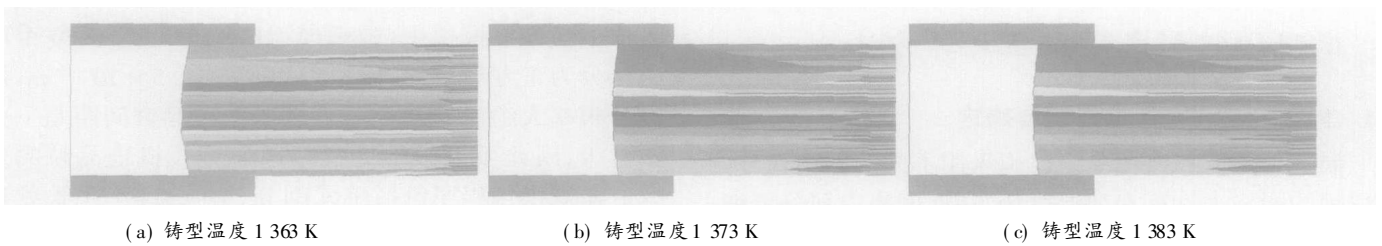


图 7 不同铸型温度下的模拟组织

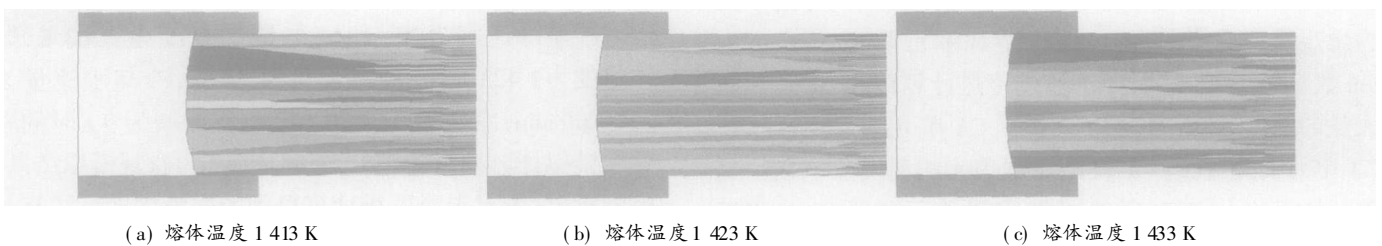


图 8 不同熔体温度下的模拟组织

的快速淘汰阶段较短。

连铸速度对组织演化的影响见图 5, 从图 5 中可以看出随着连铸速度的增大, 固-液界面的凸起趋势逐渐减小, 固-液界面的位置从铸型内部逐渐向铸型外移动, 晶粒的淘汰趋势减弱。

从图 6 中可以看出, 冷却条件对固-液界面的形状以及固-液界面的位置影响不大, 但随着冷却条件的加强, 晶粒的淘汰趋势增大。

从图 7 中可以看出, 铸型温度对固-液界面的形状影响不大, 但铸型温度增加, 固-液界面稍有变平, 界面位置外移, 晶粒淘汰趋势稍有增大。

从图 8 中可以看出熔体温度对固-液界面形状及位置的影响不大, 晶粒淘汰趋势变化不大。

从图 9 中可以看出, 冷却距离对固-液界面的形状及位置影响不大, 对晶粒的淘汰影响也不大。

通过以上模拟结果的分析, 晶粒的快速淘汰阶段与工艺参数的改变无关, 各工艺参数主要影响固-

液界面的形状、位置以及晶粒的缓慢淘汰阶段。在各工艺参数中, 连铸速度对固-液界面的形状、位置以及晶粒的淘汰影响最大, 是热型连铸过程中影响晶粒组织演化的主要因素。

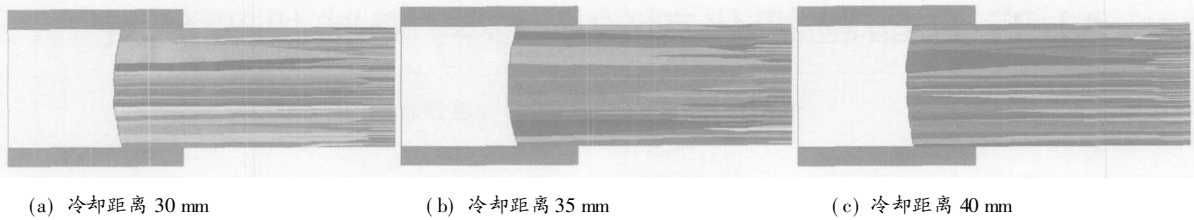


图9 不同冷却距离下的模拟组织

## 4 结论

(1) 所建立的宏-微观耦合模型是研究凝固过程微观组织演化的一种可行方法,对于研究各种工艺参数对凝固组织演化的影响以及工艺参数的优化配置具有重要的意义。Cellular Automaton 模型用于模拟热型连铸过程微观组织的形成过程,物理意义明确,是一种切实有效的微观组织模拟技术。

(2) 模拟研究表明,在各种工艺参数中,连铸速度对固液界面的形状和晶粒淘汰的影响较大,是热型连铸过程中影响组织演化的主要因素。其他工艺参数(如冷却条件、铸型温度、熔体温度以及冷却距离)对固液界面形状、位置以及晶粒的淘汰过程均有不同程度的影响,但影响程度没有连铸速度的大。

### 参 考 文 献

- 1 Brown S G R, Spittle J A. Computer Simulation of Grain Growth and Macrostructure Development During Solidification. *Mater. Sci. Tech.*, 1989(5): 362 ~ 368
- 2 Panping Z, Smith R W. Dynamic Simulation of Crystal Growth by Monte Carlo Method I: Model Disruption and Kinetics. *Acta. Metall.*, 1992, 40(4): 683 ~ 692.
- 3 Panping Z, Smith R W. Dynamic Simulation of Crystal Growth by Monte Carlo Method II: Ingot Microstructures. *Acta. Metall.*, 1992, 40(12): 3369 ~ 3379

- 4 Rappaz M. Modeling of Microstructure Formation in Solidification Processes. *International Materials Review*, 1989, 34(3): 93 ~ 123
- 5 Rappaz M, Gandin Ch-A. Probabilistic Modelling of Microstructure Formation in Solidification Processes. *Acta. Metall.*, 1993, 41(2): 345 ~ 360
- 6 Rappaz M, Gandin Ch-A. A Coupled Finite Element-Cellular Automaton Model for the Prediction of Dendritic Grain Structure in Solidification Processes. *Acta. Metall. Mater.*, 1994, 42(7): 2233 ~ 2246
- 7 丁雨田, 许广济, 戴雷. 热型连铸 A1 单晶线材组织演化过程研究. *机械工程学报*, 2000(9): 41 ~ 43
- 8 许林, 杨湘杰, 郭洪民. 用宏微观耦合模型模拟铝合金凝固过程. *特种铸造及有色合金*, 2004(3): 41 ~ 43
- 9 郭洪民, 危仁杰, 杨湘杰. 一种改进的模拟凝固微观组织的宏微观耦合模型. *特种铸造及有色合金*, 2003(5): 30 ~ 32
- 10 郝海. 电磁铸造工艺及其温度场数值模拟. [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 1998.
- 11 Rappaz M, Thevoz Ph. Solute Diffusion Model for Equiaxed Dendritic Growth. *Acta Metall.*, 1987, 35(7): 1487 ~ 1497
- 12 Rappaz M, Thevoz Ph. Solute Diffusion Model for Equiaxed Dendritic Growth: Analytical Solution. *Acta Metall.*, 1987, 35(12): 2929 ~ 2933
- 13 Oldfield W. A Quantitative Approach to Solidification Freezing of Cast Iron. *ASM Trans.*, 1966, 59: 945 ~ 960
- 14 Lipton J, Glicksman M E, Kuz W. Equiaxed Dendritic Growth in Alloys at Small Supercooling. *Metall. Trans.*, 1987, 18A: 341 ~ 345
- 15 Langer J S, J. Millar H-Krumbhaar. Stability Effects in Dendritic Crystal Growth. *Journal of Crystal Growth*, 1977, 42: 11 ~ 14
- 16 Gandin Ch.-A, Schaefer R J, Rappaz M. Analytical and Numerical Predictions of Dendritic Grain Envelopes. *Acta. Mater.*, 1996, 44(8): 3329 ~ 3347

(编辑: 张正贺)

## 意德拉王子压铸机械集团公司 招聘售后服务工程师

IDRA-Princ 意德拉王子压铸机械集团公司是全球最大的专业压铸机械生产厂家,在北美和意大利均有工厂,在欧洲的市场占有率名列前茅,美国的市场占有率位居第一。意德拉王子压铸机械集团公司生产各种规格的冷室、热室压铸机,挤压铸造机,低压铸造机及周边设备等,特别是 12 000 ~ 15 000 kN 的大型压铸机在全球压铸机行业具有绝对的优势和领导地位。为适应公司在华业务的不断扩大,我们公开招聘在压铸机械方面有专业技术水平的工程师 2 ~ 3 名。

### 职位要求:

- (1) 具有液压(泵、阀、蓄能器等)、机械等相关知识及实际应用能力;
- (2) 对可编程式逻辑控制(尤其是西门子 S7 系统)有

一定的了解;

- (3) 对机械设备和自动化设备项目有浓厚兴趣;
- (4) 良好的专业英语水平,读写流利,听说良好;
- (5) 具有压铸机或相关行业工作经验的,我们将择优录取。

公司提供优厚的待遇和职业发展机会,录用后即赴意大利或美国工厂培训。

请对以上职位有兴趣者,在 2005 年底之前将中英文简历发往以下地址:

上海市天目中路 428 号凯旋门大厦东楼 23G(200070)

意德拉王子压铸机械集团公司人事部(收)

E-mail: idra.hr@163.com

## CONTENTS & ABSTRACTS

### **Preparation of Cu-based Bulk Amorphous Alloys by Copper-mold Suction Casting Method** Kou Shengzhong<sup>1,2</sup> Li Chunyan<sup>1</sup>

Xu Guangji<sup>1</sup> Ding Yutian<sup>1</sup> Hu Yong<sup>1</sup> (1. Lanzhou University, Lanzhou, China; 2. State Key Lab. of Gansu New Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, China) 2005, 25(12) 705 ~ 707

**Abstract** The rod Cu<sub>50</sub>Zr<sub>12</sub>Al<sub>8</sub> bulk amorphous alloys with smooth surface and typical metal lightness were successfully prepared by copper-mold suction casting combining with magnetic-suspending melting method. The maximum diameter of prepared rod Cu<sub>50</sub>Zr<sub>12</sub>Al<sub>8</sub> bulk amorphous alloys is less than 5 mm under the above experimental conditions. Cu<sub>50</sub>Zr<sub>12</sub>Al<sub>8</sub> bulk amorphous alloys have excellent glass-forming ability with glass transition temperature ( $T_g$ ) 723 K, crystallization temperature ( $T_x$ ) 773 K, supercooled temperature 50 K and reduced glass transition temperature ( $T_{rg}$ ) 0.753.

**Key Words:** Cu-based Bulk Amorphous Alloys, Glass-forming Ability, Cu Mold

### **Numerical Simulation of Microstructure Formation during Solidification Process in Heated Mould Continuous Casting** Ding Yutian Xu Guangji Wang Hainan Zhang Qinyu (Lanzhou University of Technology, Lanzhou, China) 2005, 25(12) 707 ~ 711

**Abstract** A coupled macro-microcosmic model (direct difference - cellular automaton model, namely CA-DD model) was built up to simulate the competitive growth process of crystal in heated mould continuous casting based on macro-microcosmic coupling method. The effects of processing parameters on the liquid-solid interface morphology and crystal competitive growth were investigated also. The results indicate that macro-microcosmic coupling method is efficient and feasible for simulating the microstructure evolution and effects of variables on microstructure formation.

**Key Words:** Heated Mould Continuous Casting, Microstructure, Cellular Automaton, Numerical Simulation

### **Nucleation and Fading Mechanism of Al-Ti-C Master Alloy** Li Yinglong Chen Yanbo Cao Furong Wen Jingjin (Northeastern University, Shenyang, China) 2005, 25(12) 712 ~ 714

**Abstract** The microstructure characteristic of Al-Ti-C master alloy prepared by liquid-solid reaction method were investigated by SEM, XRD, EPA. Combining with thermo-dynamics approached the nucleation and fading mechanism of TiC particle. The experimental results show that the nucleation mechanism of TiC is that Ti atoms diffuse in

certain mechanism onto the surface of TiC particles to form rich Ti layer near to the chemical composition of TiAl<sub>3</sub>, meanwhile,  $\alpha$ -Al phase is formed by the peritectic reaction of TiAl<sub>3</sub> and adjacent liquid Al during solidification. The refinement effect fading is resulted from the diffusion of C from TiC to liquid Al leading to the decrease of stability and the transformation of TiC to Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> to result in the mismatch of  $\alpha$ -Al lattice.

**Key Words:** Al-Ti-C Master Alloy,  $\alpha$ -Al Nucleation Mechanism, Fading Mechanism

### **Aluminizing with Solid RE Element on Pure Copper and Composites Preparation in Internal Oxidation Method** Zhang Yi

Tian Baohong Chen Xiaohong Gao Yingying Liu Ping Li Yan (Henan University of Science and Technology, Luoyang, China) 2005, 25(12) 715 ~ 717

**Abstract** The influence of CeCl<sub>3</sub> on the kinetic process, composition, structure and property of aluminizing on the surface of pure copper was investigated. The activation energy of aluminizing is calculated by determining the aluminum depth on pure copper at different temperatures and times by means of Akinwosi equation for the research of aluminizing layer formation mechanism. The Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites was prepared by using residual oxygen in commercial N<sub>2</sub> gas to conduct internal oxidation. Aluminizing agent with CeCl<sub>3</sub> can not only possess obvious aluminizing effects but also improve the aluminizing speed. Dispersive nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle can be uniformly distributed in the internal oxidized Cu matrix.

**Key Words:** Pure Copper, Aluminizing, Internal Oxidation, Activation Energy

### **Effects of Ca Addition on the Microstructure and Tensile Properties of Mg-4Al-RE Alloy** Huang Deming Chen Yungui

Tang Yongbai Liu Hongmei Tu Mingjing (Sichuan University, Chengdu, China) 2005, 25(12) 718 ~ 721

**Abstract** The experiments from the Mg alloy with different Mg contents show that the microstructure of as-cast AE41 alloy is characterized by classical dendrite, composed of  $\alpha$ -Mg matrix and some acicular compound Al<sub>11</sub>RE<sub>3</sub>. A little Ca addition can refine the microstructure of the alloy and result in the formation of the more stable phase Al<sub>2</sub>Ca. Al<sub>2</sub>Ca phase has two morphologies: one is lamellar distributed along grain boundaries and another is granular existed within the matrix grain. The yield strength at ambient and high temperature and elevated instantaneous tensile strength of the alloys were improved