

# 铸造速度对 Al-Cu 合金半固态组织影响的多尺度模拟

张艳华<sup>1</sup> 周志敏<sup>2</sup>

(辽宁石油化工大学理学院<sup>1</sup>, 抚顺 113001; 东北大学理学院<sup>2</sup>, 沈阳 110004)

**摘要** 用多尺度模拟方法研究了半连续铸造过程与 Zl201 合金成分近似的 5% Al-Cu 合金凝固组织受铸造速度的影响。建立了温度场模型和相变模型。通过固相率的变化把温度场计算和微观组织模拟从宏观尺度和介观尺度耦合起来。将宏观尺度上计算出的稳态温度场映射到介观尺度上。利用液固相变区中原胞的平均过冷度确定半连续铸造过程中各元胞的形核, 采用溶质扩散模型描述晶粒长大。针对选定对象模拟了浇铸温度为 930 K, 铸造速度在 (1.5 ~ 3.5) mm/s 时微观组织的演变。结果表明, 当铸造速度在 2.0 mm/s 时得到的微观组织均匀、细小, 模拟结果与实验结果吻合。

**关键词** 半连续铸造 多尺度模拟 微观组织

**中图分类号** TG249.7 TB115; **文献标志码** A

自 20 世纪 70 年代 M. Flemings 教授等发现半固态金属的特殊成形特性以来, 半固态成形技术<sup>[1]</sup> 备受关注迅速成为当今最活跃的研究领域之一。随着半固态成形技术的进步和工业化应用的需要, 通过计算机对成形工艺进行数值模拟预测半固态合金组织结构的方法成为研究半固态成形的重要手段, 并取得了一定的研究成果<sup>[2,3]</sup>。

根据近液相线半连续铸造过程的特点建立了适于宏观尺度的温度场模型; 应用多尺度模拟的方法对与 Zl201 合金成分近似的 5% Al-Cu 合金进行了模拟, 模拟结果与实验相符。

## 1 模型

对一圆柱形铸锭进行研究, 考虑到其结构的几何特点和对称性, 取其中心对称剖面的一半作为研究对象 (见图 1), 从左至右依次为钢套、石墨和

铸锭。

### 1.1 温度场模型<sup>[4]</sup>

模拟根据实际情况在建立传热方程时对温度场行如下假设: (1) 沿  $z$  轴方向熔体对流速度恒定; (2) 忽略径向角向的液体流动; (3) 所要模拟的圆柱形铸件, 温度场分布为轴对称, 则在角向其温度变化满足:  $\frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0$ ; (4) 所研究系统浇铸成形过程达到稳态, 因此温度值不随时间发生变化。

引用金属连续铸造的稳态温度场及其非物理边界条件模型, 给出温度场表达式

$$\frac{\lambda}{\rho C_p} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - u_z \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{L}{C_p} \frac{\partial f_s}{\partial t} \right] = 0 \quad (1)$$

式(1)中:  $r$  和  $z$  分别表示径向和轴向;  $u_z$  为铸造速度;  $T$  为温度;  $t$  为时间;  $\lambda$  为热导率;  $C_p$  金属热容;  $L$  为结晶潜热;  $f_s$  为固相率, 其处理方法如下

$$\frac{\partial f_s}{\partial t} = - \frac{1}{T_l - T_s} u_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

式(1)中:  $T_l$  和  $T_s$  分别为凝固开始和凝固结束的温度。

温度场边界条件: 结晶器入口处熔体温度为浇



溶质平衡,模拟区域的边界条件采用零流边界条件

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0。$$

## 2 模拟结果及讨论

对 Cu 含量为 5%、浇铸温度为 930 K、铸造速度为  $(1.5 \sim 3.5)$  mm/s、水冷系数  $1\ 000$  ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ) 的 Al-Cu 合金进行组织模拟。如图 1 所示,各部分尺寸: $r_s = 30$  mm, $w_i = 5$  mm, $w_o = 3$  mm, $h_s = 80$  mm, $h_i = 60$  mm;相应的网格大小为: $n_s = 80$ , $m_s = 30$ , $n_i = 60$ , $m_o = 3$ , $m_i = 5$ ;冷却水和环境温度取室温 298K;空气换热系数为  $100$  ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ );熔体、石墨和钢的导热系数分别为 192.0、23.865 和  $59.4$  ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ),液相扩散系数取  $10^{-9}$   $\text{m}^2/\text{s}$ ,固相扩散系数取  $10^{-13}$   $\text{m}^2/\text{s}$ ,其他参数依相图选取,温度通过差值分别映射到  $r = 1, 15$  和  $29$  mm 的 a, b 和 c 三个位置处,宽度为 1 mm 高度为  $h_s$  的区域,元胞尺寸为  $5\ \mu\text{m}$ 。

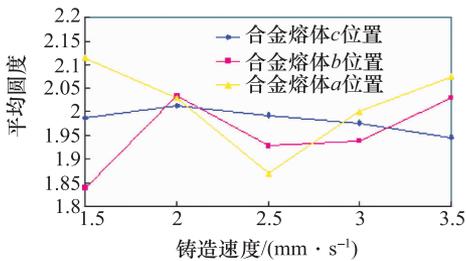


图 2 合金晶粒平均尺寸随铸造速度的变化

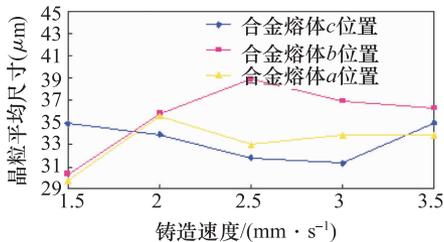


图 3 合金平均圆度随铸造速度的变化图

从图 2 和图 3 的模拟结果中可以看出铸造速度为 2 mm/s 时在各处形成的晶粒尺寸更细小,三个位置的晶粒尺寸差别不大,晶粒的平均圆度也较小,综合结果较好。图 4 为铸造速度为 2 mm/s 时的

模拟结果,从图中可以看出三个位置处的晶粒均匀细小,与图 5 的实验结果吻合很好。

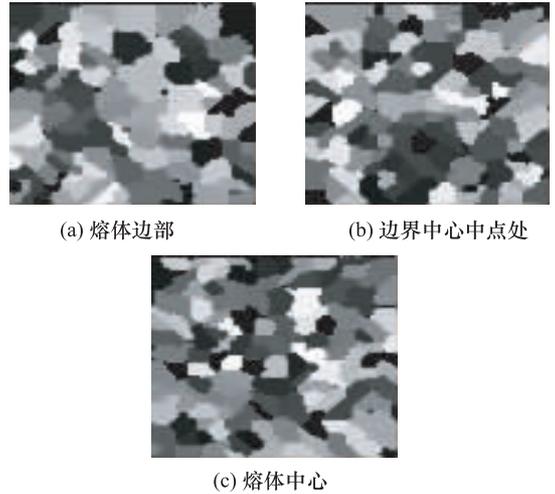


图 4 铸造速度为 2 mm/s 时合金微观组织

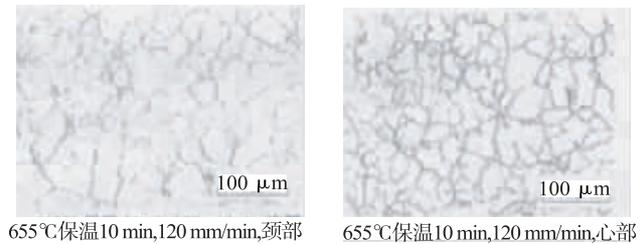


图 5 ZL201 合金的近液相线铸造的实验结果<sup>[8]</sup>

为了研究铸造速度对凝固组织的影响,采用了相同的浇铸温度和冷却强度,从模拟结果可知铸造速度对晶粒平均尺寸和平均圆度有影响,铸造速度快时熔液浇注到铸模后停留时间短没有足够的时间扩散,界面稳定性被破坏,从而影响晶粒的尺寸和圆度;铸造速度慢会在熔体内造成较大的温度差减少形核的数目和均匀程度,近而使晶粒被拉长。因此铸造速度与合金成分、浇铸温度、冷却强度等因素达到一个最佳匹配才能得到均匀细小的等轴晶。在本文给定的条件下与之匹配的铸造速度为 2 mm/s。

## 3 结论

(1) 应用多尺度模拟模型能合理地描述 Al-Cu 合金的近液相线铸造过程,计算效率高,结果与实

验结果吻合很好。

(2) 从模拟结果中可知对 5% Al-Cu 合金在浇铸温度为 930 K, 水冷系数为  $1\ 000\ (\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$  时, 铸造速度为  $2.0\ \text{mm}/\text{s}$  时能获得均匀、细小的等轴晶。

### 参 考 文 献

- 1 Flemings M C. Behaviour of metal alloys in the semi-solid state. Metall Trans, 1991; 22A(5): 957—981
- 2 王 娜, 周志敏, 路贵民. 6061 合金近液相线铸造微观组织的多尺度模拟. 特种铸造及有色合金, 2008 年年会专刊, 2008; 508—510
- 3 路贵民, 周志敏. 浇铸温度对半连续铸造组织的多尺度模拟. 特种铸造及有色合金, 2008; 28(4): 247—250
- 4 周志敏, 路贵民. 连续铸造稳定温度场非物理边界条件的确定. 东北大学学报(自然科学版), 2008; 29(8): 1130—1134
- 5 Rappaz M, Thevoz Ph. Solute diffusion model for equiaxed dendritic growth. Acta Metal, 1987; 35(7): 1487—1497
- 6 陈 晋, 朱鸣芳, 孙国雄. 用 CA 方法模拟过冷熔体中自由树枝晶的生长. 金属学报, 2005; 41(8): 799—803
- 7 陈 晋, 朱鸣芳, 孙国雄. 过冷熔体中的树枝晶分枝体制模拟. 铸造, 2005; 54(9): 895—898
- 8 王 平, 史立峰, 路贵民. ZL201 铝合金近液相线半连续铸造组织研究. 轻合金加工技术, 2005; 33(6): 5—7

## Multi-scale Simulation of Influence of Casting Speed on Microstructure Evolution of Al-Cu Alloy

ZHANG Yan-hua<sup>1</sup>, ZHOU Zhi-min<sup>2</sup>

(School of science, Liaoning Shihua University<sup>1</sup>, Fushun 113001, P. R. China;

School of sciences, Northeast University<sup>2</sup>, Shenyang 110004, P. R. China)

**[ Abstract ]** The influence of casting speed on the solidified structure of 5% Al-Cu alloy same to ZL201 alloy during semi-continuous casting was investigated by a multi-scale simulation method. The models of temperature field and phase transformation are established for the casting and the change in solid fraction was available to couple the macro-scale simulation with meso-scale one. The change in steady temperature field was projected to a macro-scale area to determine the nucleation of cell in transformation zone. The grain growing process was described by solute diffusion model. The Microstructure evolution was simulated during near liquidus casting at casting speed of (1.5 ~ 3.5) mm/s, respectively, with pouring temperature 930 K. The results show that the simulation results are well consistent with the experimental results.

**[ Key words ]** semi-continuous casting    multi-scale simulation    microstructure