

## 弹簧钢 60Si2Mn 大方坯凝固组织的数值模拟

任 巍 张炯明 王金龙 叶凡新 龚雅林  
(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

**摘 要** 运用 ProCAST 软件的 CAFE 模块对 60Si2Mn 弹簧钢 325 mm × 280 mm 连铸坯的凝固组织进行模拟,研究了钢水过热度 and 二冷强度对铸坯凝固组织的影响。结果表明,浇钢过热度从 10 °C 增大到 30 °C 后,铸坯晶粒密度从  $1.055 \times 10^6 \text{ m}^{-2}$  减小到  $1.520 \times 10^5 \text{ m}^{-2}$ ,柱状晶显著发达;浇钢过热度同为 20 °C 时,二冷区采用强冷后,晶粒密度从  $1.009 \times 10^6 \text{ m}^{-2}$  增加到  $1.083 \times 10^6 \text{ m}^{-2}$ ,等轴晶率增大 5%。

**关键词** 弹簧钢 大方坯 凝固组织 钢水过热度 二冷强度

## Numerical Simulation on Solidification Structure of Cast Bloom of Spring Steel 60Si2Mn

Ren Wei, Zhang Jiongming, Wang Jinlong, Ye Fanxin and Gong Yalin  
(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** Solidification structure of 325 mm × 280 mm cast bloom of spring steel 60Si2Mn has been simulated with CAFE module of ProCAST software to study the effect of liquid superheating extent and secondary cooling intensity on structure of solidification of cast bloom. Results showed that with increasing liquid superheating extent from 10 °C to 30 °C, the density of grain in bloom decreased from  $1.055 \times 10^6 \text{ m}^{-2}$  to  $1.520 \times 10^5 \text{ m}^{-2}$  and the columnar crystal obviously developed; as liquid superheating extent was 20 °C with intensive secondary cooling, the equiaxial crystal zone ratio increased by 5% and the grain density increased from  $1.009 \times 10^6 \text{ m}^{-2}$  to  $1.083 \times 10^6 \text{ m}^{-2}$ .

**Material Index** Spring Steel, Bloom, Solidification Structure, Liquid Superheating Extent, Intensity of Secondary Cooling

1993 年 Rappaz 和 Gandin<sup>[1]</sup> 将称之为 Cellular Automaton 方法(简称 CA 法)用于模拟凝固微观组织的形成过程。该方法是用有限元-FE 热模型离散凝固过程和二次划分网格以用 Cellular Automaton-CA 方法建模晶粒形核与生长耦合而成,简称 CAFE 法。

### 1 数学物理模型

本模型以长 50 mm、横截面 325 mm × 280 mm 的方坯为三维热、流模拟研究域,以其中 2 mm 厚的 162.5 mm × 140 mm 横截面 1/4 角部区域为三维 CA 模拟研究域,研究不同浇钢过热度 and 不同二冷强度对铸坯凝固组织的影响。模型有如下假设条件:(1)只考虑各合金元素与基体 Fe 的二元相图;(2)假设液相为不可压缩流体,不考虑凝固收缩和线收缩;(3)部分热物性参数为常数。

#### 1.1 形核

假定金属凝固以异质形核为主,形核密度采用高斯分布的连续形核模型,即用连续的而非离散的分布函数  $dn/d(\Delta T)$  来描述晶粒密度  $n(\Delta T)$  的变化。其中

$dn$  是由过冷度  $\Delta T$  的增加引起的晶粒密度增加。给定  $\Delta T$  时,  $n(\Delta T)$  由该分布曲线的积分求得<sup>[2,3]</sup>:

$$\frac{dn}{d(\Delta T)} = \frac{n_{\max}}{\sigma_{\Delta T} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta T - \Delta T_m}{\sigma_{\Delta T}}\right)^2\right] \quad (1)$$

式中:  $\Delta T$ - 计算过冷度/°C;  $\Delta T_m$ - 平均过冷度/°C;  $\sigma_{\Delta T}$ - 标准偏差;  $n_{\max}$ - 正态分布从 0 到无穷大积分得到的最大形核密度。

#### 1.2 晶粒生长动力学

模型晶粒生长动力学采用 KGT(Kurz, Givonola, Trivedi)模型,在实际模拟过程中,为了加速计算的进程,对 KGT 模型进行拟合,得到如下枝晶尖端生长速度的多项式:

$$v(\Delta T) = a_2 \Delta T^2 + a_3 \Delta T^3 \quad (2)$$

式中:  $a_2$ 、 $a_3$ - 分别是拟合多项式的系数;  $\Delta T$ - 枝晶尖端过冷度/°C。

#### 1.3 晶粒生长

晶粒的生长都是基于有限八面体的 [111] 面,

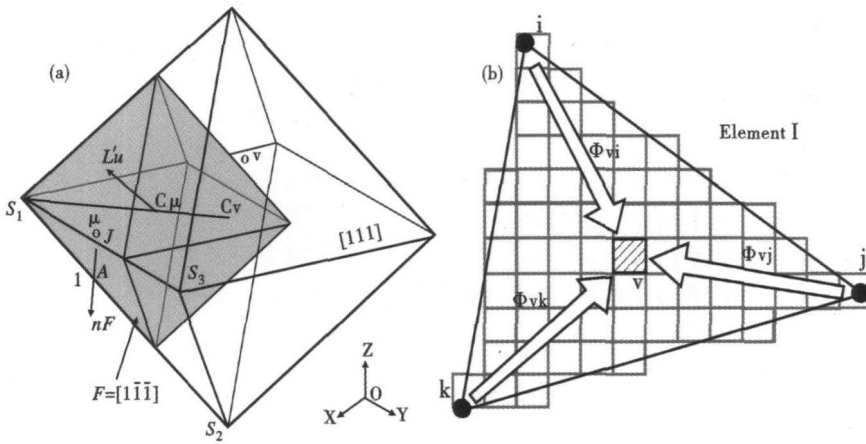


图 1 正八面体 CA 生长法则(a)和 FE 节点与 CA 节点关系(b)示意图

Fig.1 Schematics of de-centered octahedron CA growth algorithm (a) and relation between CA nodes and FE mesh (b)

对每个生长的元胞赋予非零的状态因子( $I_v \neq 0$ ), 计算时,在相邻元胞中至少有一个是液态。图 1(a)是元胞  $v(I_v \neq 0)$  和生长的八面体正捕获一个相邻元胞  $\mu(I_\mu = 0)$  的示意图。被捕获元胞  $\mu$  的状态因子会转变为母元胞  $v$  的状态因子(也就是  $I_\mu = I_v$ , 即与母元胞保持相同的生长取向),当生长的八面体和元胞  $\mu$  完全糊状区元胞包围时便停止生长。八面体的主要斜线方向( $X, Y, Z$  轴)是  $\langle 100 \rangle$  晶向。

1.4 FE 与 CA 的耦合

在 CAFE-3D 模型中,将有限元网格用于连铸过程的热、流计算,而将更加细密的规则方形网格用于 CA 计算晶粒组织。为了耦合有限元 FE 和 CA 方法,引入凝固潜热的影响,确保微观组织时温度场的函数,定义了有限元网格节点和 CA 元胞之间的插值因子。如图 1(b)所示,中心在有限元网格的 CA 元胞  $v$  与有限元节点  $i, j, k$  之间分别具有非零的插值因子  $\Phi_{vi}, \Phi_{vj}, \Phi_{vk}$ 。这些因子结合有限元节点的温度就可以确定网格中元胞处的温度。在节点处,采用同样的插值因子对树枝晶组织形核、生长过程释放的潜热求

表 1 60Si2Mn 钢热物性参数

Table 1 Thermophysical property parameters of spring steel 60Si2Mn

| 项目                                  | 数据    | 项目  | 数据                   |
|-------------------------------------|-------|---|----------------------|
| C/%                                 | 0.6   | Mn 的液相线斜率/( $^{\circ}\text{C}/\%$ )             | -3.32                |
| C 的分配系数                             | 0.34  | 液相线温度/ $^{\circ}\text{C}$                       | 1463                 |
| C 的液相线斜率/( $^{\circ}\text{C}/\%$ )  | -78   | 固相线温度/ $^{\circ}\text{C}$                       | 1356                 |
| Si/%                                | 1.6   | Gibbs-Thompson 系数/( $\text{K} \cdot \text{m}$ ) | $1.9 \times 10^{-7}$ |
| Si 的分配系数                            | 0.59  | Cr/%  | 0.08                 |
| Si 的液相线斜率/( $^{\circ}\text{C}/\%$ ) | -17.1 | P/%   | 0.006                |
| Mn/%                                | 0.73  | S/%   | 0.009                |
| Mn 的分配系数                            | 0.75  | Cu/%  | 0.006                |

注:项目中成分为质量分数。

和,更新节点温度。

2 计算条件和物性参数

计算过程采用的边界冷却条件参数由生产现场的配水水量和进出水温差通过经验公式换算得出,各区的换热系数以时间函数形式赋值给模型边界,保证模型边界的冷却条件和现场铸坯从弯月面到切割点之间的冷却条件一致。

计算的钢种为 60Si2Mn 弹簧钢,其主要成分和计算的部分热物性参数示于表 1。

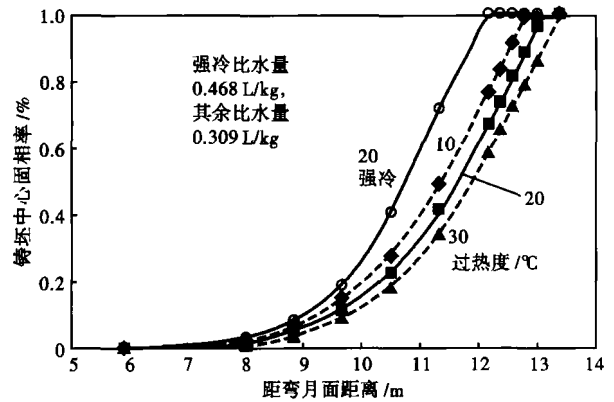


图 2 铸坯中心固相率变化的模拟示意图,拉速 0.5 m/min  
Fig.2 Schematics of change of simulated solidified phase ratio in center of bloom, casting rate 0.5 m/min

3 结果与讨论

由图 2 可见,随浇钢过热度的增加,冶金长度略微增加;而当二冷区采用强冷时,冶金长度明显减小。在各种条件下,凝固末端的两相区长度为 4 ~ 5.5 m,凝固末端在凝固初期的中心固相率增长缓慢,而到后期则迅速增长。说明在铸坯中心固相率超过 40%后,随着钢液过热度的消失,出现了一个加速冷却和凝固的阶段。

图 3 为铸坯横截面的 1/4 角部区域的凝固组织模拟计算区域示意图。

由图 4 中(a)、(b)和(c)对比可见,浇钢过热度为 10  $^{\circ}\text{C}$  时,没有发达的柱状晶,等轴晶率达 80% 以上;过热度被提高为 20  $^{\circ}\text{C}$  和 30  $^{\circ}\text{C}$  后,铸坯柱状晶和枝晶明显变发达,等轴晶率显著减小,分别只有 45% 和 30%,而且过热度为 30  $^{\circ}\text{C}$  时的铸坯柱状晶和枝晶比 20  $^{\circ}\text{C}$  时的明显粗大。由图 4(b) 和图 4(d)

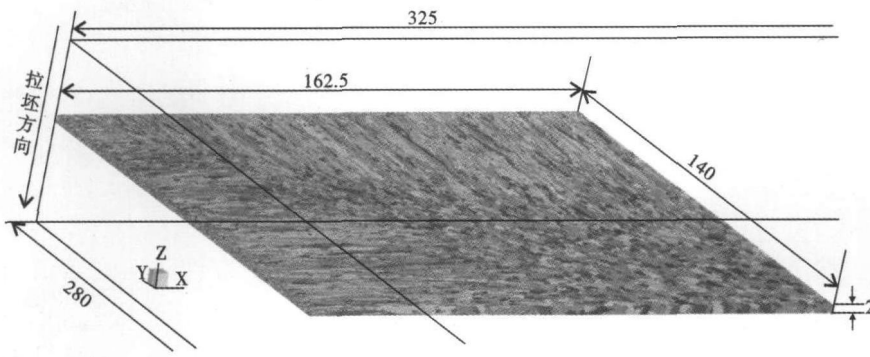


图3 铸坯角部 1/4 区域凝固组织模拟示意图

Fig.3 Schematics of simulated solidification structure of 1/4 area at angle of bloom

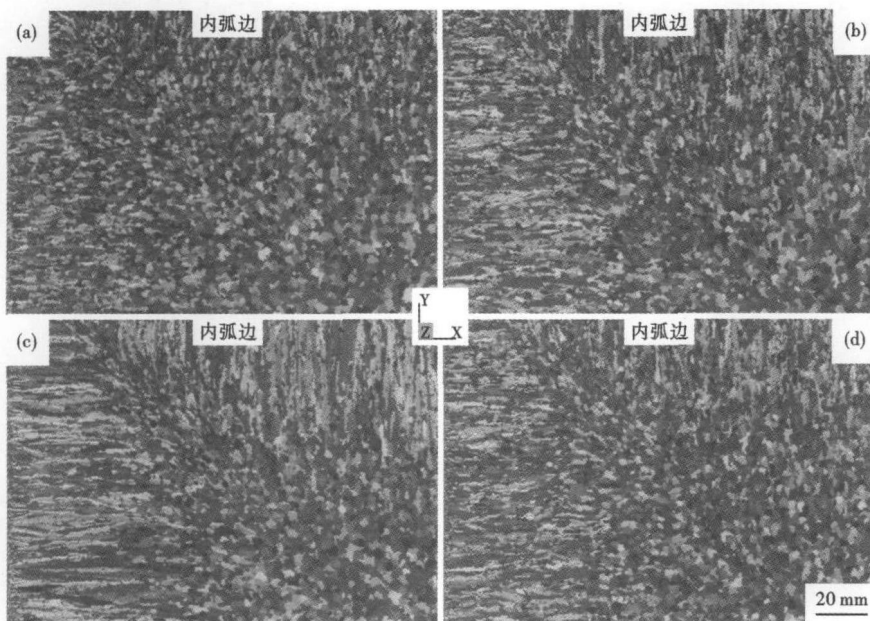


图4 铸坯横截面 1/4 区域凝固组织模拟形貌图: 钢水过热度(a)10 °C; (b)20 °C; (c)30 °C; (d)20 °C时二冷强冷

Fig.4 Schematics of simulated solidification structure of 1/4 area at angle of bloom cross section: liquid superheating extent (a) 10 °C, (b) 20 °C, (c) 30 °C, (d) 20 °C with intensive secondary cooling

表2 60Si2Mn 钢的模拟结果统计

Table 2 Statistics of simulated results for steel 60Si2Mn

| 项目                   | 过热度/°C                   |                          |                          |                          |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                      | 10                       | 20                       | 30                       | 20 °C 二冷强冷               |
| 晶粒密度/m <sup>-2</sup> | 1.055 × 10 <sup>6</sup>  | 1.009 × 10 <sup>6</sup>  | 1.520 × 10 <sup>5</sup>  | 1.083 × 10 <sup>6</sup>  |
| 平均表面积/m <sup>2</sup> | 9.475 × 10 <sup>-7</sup> | 9.908 × 10 <sup>-7</sup> | 1.028 × 10 <sup>-6</sup> | 9.233 × 10 <sup>-7</sup> |
| 最大表面积/m <sup>2</sup> | 6.480 × 10 <sup>-6</sup> | 1.006 × 10 <sup>-5</sup> | 2.557 × 10 <sup>-5</sup> | 9.180 × 10 <sup>-6</sup> |
| 平均半径/m               | 7.068 × 10 <sup>-4</sup> | 8.280 × 10 <sup>-4</sup> | 9.954 × 10 <sup>-4</sup> | 8.207 × 10 <sup>-4</sup> |

对比可见,二冷区采用强冷后,铸坯等轴晶率增大5%。

表2是在以上4种条件下,图3中Y轴正方向视图的模拟凝固组织的晶粒参数统计,计算区域长度为162.5 mm、厚度为2 mm。可见,随着浇钢过热度从10 °C被提高到30 °C,晶粒密度从1.055 × 10<sup>6</sup> m<sup>-2</sup>减小

到1.520 × 10<sup>5</sup> m<sup>-2</sup>,而晶粒平均半径从706.8 μm增大到995.4 μm。浇钢过热度同为20 °C时,二冷区采用强冷后,晶粒密度从1.009 × 10<sup>6</sup> m<sup>-2</sup>增加到1.083 × 10<sup>6</sup> m<sup>-2</sup>,晶粒平均半径从828.0 μm减小到820.7 μm。

#### 4 结论

(1) 60Si2Mn 弹簧钢连铸坯在模拟条件下,凝固末端的两相区长度为4 ~ 5.5 m,铸坯中心固相率超过40%后,会加速冷却和凝固。相同凝固条件下,模拟出的组织形貌和实验结果能较好吻合。

(2) 钢水过热度从10 °C提高为20 °C和30 °C后,铸坯柱状晶和枝晶明显变发达,等轴晶率显著减小。晶粒密度从1.055 × 10<sup>6</sup> m<sup>-2</sup>减小到1.520 × 10<sup>5</sup> m<sup>-2</sup>,而晶粒平均半径从706.8 μm增大到995.4 μm。

(3) 钢水过热度为20 °C,二冷比水量从0.309 L/kg提高到0.468 L/kg时,晶粒密度从1.009 × 10<sup>6</sup> m<sup>-2</sup>增加到1.083 × 10<sup>6</sup> m<sup>-2</sup>,晶粒平均半径从828.0 μm减小到820.7 μm,铸坯等轴晶率增加5%。

#### 参考文献

- Gandin Ch-A, Rappaz M. A Couple Finite Element-Cellular Automaton Model for the Prediction of Dendritic Grain Structure in Solidification Process. *Acta Metall*, 1994, 40(7): 2233
- Zenon Ignaszak, Mieczyslaw Haikowski, Jakub Hajkowski. Prediction of Dendritic Microstructure Using the Cellular Automaton-Finite Element Method for Hypoeutectic Al-Si Alloys Castings. *Materials Science*, 2006, 12(2): 124
- Gandin Ch-A, Desbiolles J-L, Rappaz M, et al. A Three-Dimensional Cellular Automaton-Finite Element Model for the Prediction of Solidification Grain Structures. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, 30(A): 3153

任 菟(1983-),男,硕士研究生,连铸弹簧钢大方坯凝固组织与成分偏析的研究。

收稿日期:2009-01-19