

E36 船板钢板坯凝固组织模拟研究和应用

郭浩天¹ 孙彦辉¹ 李曜光¹ 卢欣欣¹ 曾凡政² 杨勇²

(1 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心,北京 100083;2 湖南华菱湘潭钢铁有限公司,湘潭 411101)

摘要 为改善钢厂 E36 钢板坯内部质量,通过 ProCAST 软件建立 E36 钢板坯凝固过程数学模型,并在此基础上采用 CAFE 模块对研究过热度(10~25℃)、拉速(0.70~0.85 m/min)和二冷比水量(0.30~0.39 L/kg)等不同连铸工艺参数以及加入电磁搅拌的 300 mm×2 070 mm 铸坯凝固组织进行模拟。从模拟的结果可知,过热度每增加 10℃,等轴晶区比例减少 3%,随着过热度的增加,柱状晶区增大,等轴晶区减少。在二冷区安装电磁搅拌使等轴晶区增加,平均晶粒半径减小。根据模拟结果进行工艺优化,将过热度由 15℃降到 10℃。通过对比优化前后铸坯低倍组织,可以看出铸坯等轴晶区明显增大,中心偏析得到有效改善。

关键词 E36 船板钢 板坯 凝固组织 数值模拟 过热度

Simulation Study and Application on Solidification Structure of E36 Steel Ship Slab

Wu Haotian¹, Sun Yanhui¹, Li Yaoguang¹, Lu Xinxin¹, Zeng Fanzheng² and Yang Yong²

(1 Collaborative Innovation Center for Common Technology of Iron and Steel, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083;2 Hunan Hualin Xiangtan Iron & Steel Co Ltd, Xiangtan 411101)

Abstract In order to improve the internal quality of E36 steel slab in a steel plant, a mathematical model of the solidification process of E36 steel slab is established through ProCAST software, and on this basis, the CAFE module is used to simulate the solidification structure of 300 mm×2 070 mm the cast slab with the superheat 10~25℃, casting speed 0.70~0.85 m/min and secondary cooling ratio 0.30~0.39 L/kg different process parameters as well as adding EMS are studied. From the simulation results, it can be seen that for every 10℃ increase in superheat, the proportion of equiaxed crystal regions decreases by 3%. As the degree of superheat increases, columnar crystal regions increase, equiaxed crystal regions decrease. The installation of electromagnetic stirring in the second cold zone increases the equiaxed crystal zone and reduces the average crystal grain radius. According to the simulation results, the process is optimized and the superheat is reduced from 15℃ to 10℃. By comparing the low magnification structure of the cast slab before and after the optimization, it can be seen that the equiaxed crystal zone of the cast slab is significantly enlarged, and the center segregation is effectively improved.

Material Index E36 Ship Plate Steel, Slab, Solidification Structure, Numerical Simulation, Superheat Extent

E36 钢属于海洋平台和舰船用钢,因为工作环境气象条件复杂,对其质量有严苛的要求^[1]。中心偏析作为连铸凝固过程中组织的重要缺陷,会引起钢的质量和性能明显的恶化^[2]。增加铸坯等轴晶有利于中心偏析的改善。等轴晶结构致密,其彼此相互嵌入,结合牢靠,不易产生弱化面,加工性能好,钢的力学性能各向同性。等轴晶的形成主要受到冷却条件、铸坯拉速和过热度的影响^[3],加入电磁搅拌技术也能有效地增大等轴晶区从而改善铸坯质量^[4]。

1 模型建立

基于 ProCAST 软件的 CAFE 模块进行模拟计算。CAFE 法是元胞自动机模型(CA)与有限元方

法(FE)的偶合,它的偶合是 Rappaz 和 Gandin 等人^[5-7]通过试验证明而实现的。采用(FE)法计算温度场,然后(CA)法基于温度计算结果来进行晶粒形核生长的运算。

1.1 形核模型

假设形核发生在各种不相同的形核位置上,并且晶粒密度变化可由连续而又非离散的分布函数来确定,如式(1):

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

式中: dn - 由过冷度 $d\Delta T$ 的增加引起晶粒密度的增加,因此在某一过冷度下晶粒密度可以由式(2)

通讯作者:孙彦辉,教授,北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心,北京 100083

E-mail:sun-yanhui@163.com

计算:

$$n(\Delta T) = \int_0^{\Delta T} \frac{dn}{d(\Delta T)} d(\Delta T) \quad (2)$$

式中: n - 晶粒密度; ΔT - 过冷度; n_{\max} - 最大形核密度; ΔT_{σ} - 标准偏差; ΔT_{\max} - 最大过冷度。

1.2 生长模型

实际合金在凝固时, 晶体的长大受成分过冷和动力学过冷的共同影响, 总过冷度 ΔT 如式(3):

$$\Delta T = \Delta T_c + \Delta T_i + \Delta T_r + \Delta T_k \quad (3)$$

式中: ΔT_c 、 ΔT_i 、 ΔT_r 和 ΔT_k - 分别为成分过冷度、热过冷度、动力学过冷度和曲率过冷度, 大部分合金的后三项相对于 ΔT_c 来说很小, 所以可以忽略不计。用式(4)对过冷度与速度关系进行拟合:

$$v(\Delta T) = a_2 \Delta T^2 + a_3 \Delta T^3 \quad (4)$$

式中: a_2 、 a_3 - 生长动力学参数; ΔT - 枝晶尖端的总过冷度。

2 E36 钢凝固组织模拟

2.1 初始条件

以钢厂断面尺寸为 2 070 mm × 300 mm 的 E36 钢铸坯为研究对象, 建立了铸坯凝固组织模型。由于板坯在宽度方向具有对称性, 为了降低计算成本, 故只建立了 1/2 宽度的铸坯三维网格模型, 并采用“薄片移动法”来研究连铸过程中的凝固组织演变规律。

E36 钢的化学成分见表 1。通过 ProCAST 软件来计算 E36 钢所得到的固相和液相线温度为 1 476 °C 和 1 517 °C。

作为温度函数的其他热物性参数, 如图 1 所示。

从图 1 可以看出, E36 钢的热物性参数在 1 480 ~ 1 510 °C 有着显著变化, 主要是因为温度范围区间内钢液凝固过程中经历相变。

2.2 工艺与模拟参数

结晶器、二冷区的设备及工艺参数如表 2、表 3 所示。钢中主要合金元素的液相线斜率^[8]、分配系数^[9]和自扩散系数^[10], 如表 4 所示。

对凝固组织进行模拟, 其形核参数为: Gibbs-Thompson 系数^[11]取 3×10^{-7} m/K; 体形核参数

表 1 E36 钢化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of steel E36 / %

C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ni
0.11	0.3	1.56	0.010	0.010	0.042	0.056	0.21

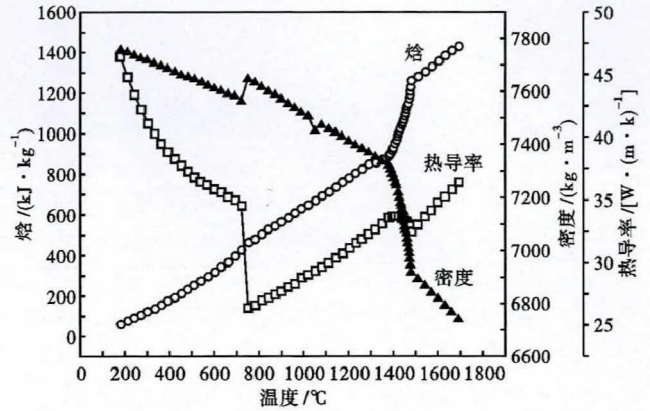


图 1 E36 钢热物性参数

Fig. 1 Thermophysical parameters of E36 steel

表 2 结晶器设备参数 / mm

Table 2 Mold equipment parameters / mm

项目	数值
高度	900
有效高度	800
铜板厚度	28 ~ 40
内腔尺寸	上口 2 291、下口 2 268

表 3 二冷区的工艺参数

Table 3 Process parameters of secondary cooling zone

区段	分区长度 / mm	冷却水量 / (L · min ⁻¹)
足辊段 (1 区)	240	115
2 区	560	182
3 区	1 110	198
4 区	1 550	152
5 区	1 910	46
6 区	3 840	71
7 区	3 840	45
8 区	6 630	43
9 区	6 700	38
10 区	9 370	46

注: 冷却水量 9 区、10 区为内弧, 其余为内外弧。

表 4 主要元素相关参数

Table 4 Main elements related parameters

项目	C	Si	Mn	P	S	Ni
质量分数 C_0 / %	0.11	0.3	1.56	0.010	0.010	0.21
液相线斜率 m	-78.2	-17.8	-48.15	-48.3	-16	-3.9
分配系数 k	0.17	0.27	0.68	0.13	0.05	0.75
自扩散系数 $D \times 10^{-9} / (m^2 \cdot s^{-1})$	11	8.5	2.4	4.6	3.5	4.3

$\Delta T_{\nu, \max} = 1.5$ K, $\Delta T_{\nu, \sigma} = 0.1$ K, $n_{\nu, \max} = 5 \times 10^7$; 面形核参数 $\Delta T_{s, \max} = 0.5$ K, $\Delta T_{s, \sigma} = 0.1$ K, $n_{s, \max} = 5 \times 10^7$; 生长动力学参数 $a_2 = 0$, $a_3 = 7.915 \times 10^{-7}$ m / (s · k)。

3 模型的验证

3.1 温度场模型的验证

为了验证温度场模型的准确性,通过红外测温枪对实际生产过程中板坯宽面中心表面温度进行测量。图2为模拟结果与测量结果的对比,可知模拟的结果基本符合现场测温情况。

3.2 CAFE 模型的验证

在现场工业生产的参数下(拉速 0.8 m/min、过热度 15 °C、二冷比水量 0.33 L/kg)运用 ProCAST 软件对凝固组织进行模拟,并取对应铸坯试样进行热酸侵蚀实验。图3为凝固组织模拟和热酸侵蚀实验结果对比,从图3中可知,实际和模拟凝固组织中心等轴晶区的比例分别为 14.9% 和 16.4%,相差仅 1.5%,说明模拟结果是可靠有效的。

4 不同的工艺参数的影响

连铸坯的致密度对铸坯的质量也有一定影响,晶粒的大小可以用来评价和对比致密度。沿着铸坯横截面的中心线对铸坯进行切割,每个切片的厚度为 5 mm,如图4所示。统计其中心等轴晶区 20 mm × 1 050 mm 的截面的晶粒尺寸和数目来进行评价和对比。

4.1 拉速对凝固组织的影响

当过热度和比水量一定时(过热度 15 °C、二冷比水量 0.33 L/kg),模拟了四个不同的拉速下凝固组织的变化,其模拟结果如图5所示。当拉速从 0.7 m/min 升高至 0.85 m/min 时,等轴晶区比例分别为 18.9%、20.7%、21.7%、22.4%。表明随着拉速的增大,等轴晶率增大,但是变化的幅度比较小。实际中,板坯表面拉坯速度越大,铸坯在结晶器和二冷区的停留时间就越短,导致同一时刻下的板坯表面冷却强度降低,使得凝固前沿温度梯度减小,促进了晶粒的形核生长。表5是统计了铸坯中心等轴晶区的晶粒数目和平均晶粒半径随拉速的变化情况。随着拉速的增大,其晶粒数目略有减小,平均晶粒半径增大。

4.2 二冷比水量对凝固组织的影响

当过热度和拉速一定时(过热度 15 °C、拉速 0.8 m/min),模拟了4个不同的二冷比水量下凝固组织的变化,模拟结果表明,当二冷比水量 0.3 L/kg 升高至 0.39 L/kg 时,等轴晶区比例分别为 22.7%、21.7%、19.1%、17.6%。表明二冷比水量增加,等

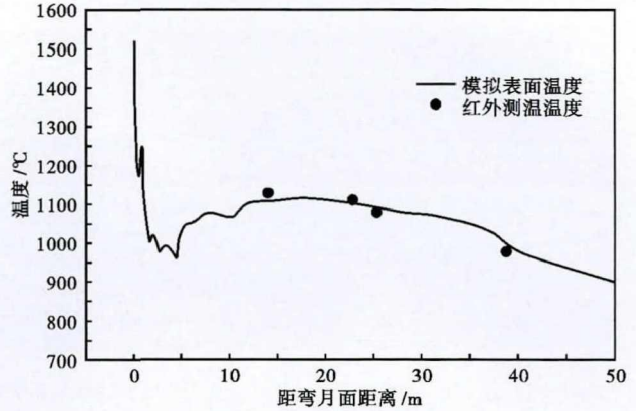


图2 铸坯表面温度模拟曲线和实测值

Fig. 2 Surface temperature simulation curve and real measurement value of casting slab

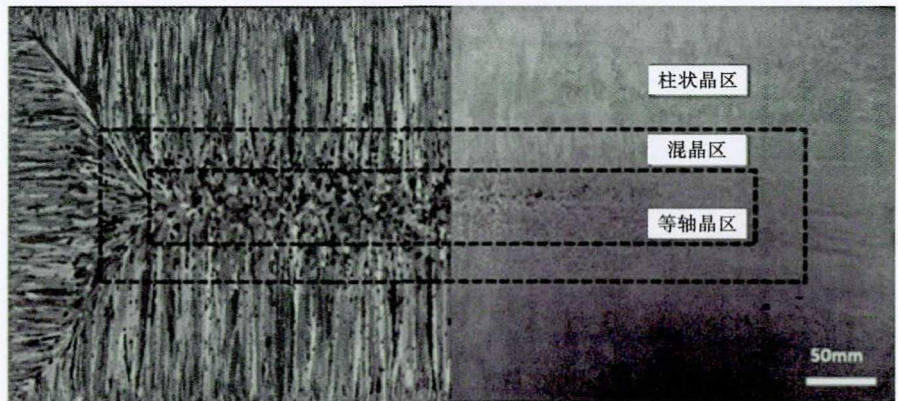


图3 凝固组织模拟和热酸侵蚀实验结果对比

Fig. 3 Comparison between simulation results of solidification structure and hot acid etched experiment result

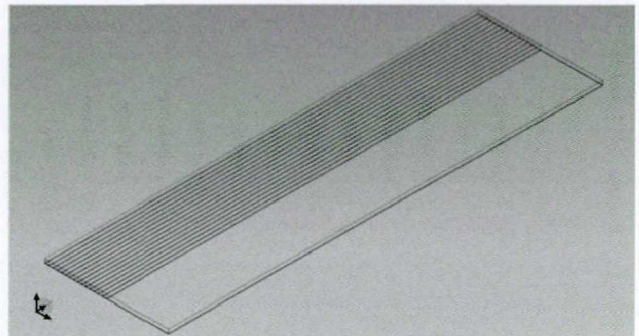


图4 切片示意图

Fig. 4 Slice diagram

轴晶率减小。其原因是随着二冷比水量的增加,冷却强度提高,凝固前沿温度梯度增大,从而抑制了晶粒形核和长大。表6是统计了铸坯中心等轴晶区的晶粒数目和平均晶粒半径随二冷比水量的变化情况。随着二冷比水量的增大,其晶粒数目增加,平均晶粒半径减小。

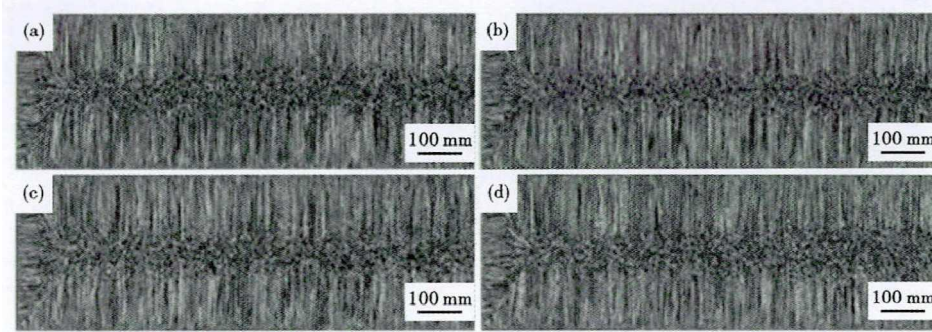


图 5 拉速/(m·min⁻¹):0.70(a),0.75(b),0.80(c),0.85(d)对铸坯凝固组织的影响
Fig.5 Effect of casting speed/(m·min⁻¹):0.70(a),0.75(b),0.80(c),0.85(d) on solidification structure of casting slab

表 5 不同拉速下铸坯等轴晶区晶粒统计结果

Table 5 Statistic results of grains in equiaxed region of casting slab with different casting speeds

拉速 / (m·min ⁻¹)	晶粒数目	平均晶粒半径 / mm
0.70	1 519	1.342
0.75	1 503	1.381
0.80	1 492	1.398
0.85	1 462	1.446

表 6 不同二冷比水量下等轴晶区晶粒统计结果

Table 6 Statistic results of crystal grains in equiaxed area with different secondary cooling water ratio

二冷水比量 / (L·kg ⁻¹)	晶粒数目	平均晶粒半径 / mm
0.30	1 473	1.437
0.33	1 492	1.398
0.36	1 508	1.365
0.39	1 541	1.315

4.3 过热度对凝固组织的影响

当拉速和比水量一定时,模拟了 4 个不同的过热度下凝固组织的变化,模拟结果表明,当过热度从 10 ℃ 升高至 25 ℃ 时,等轴晶区比例分别为 21.7%、18.8%、15.9%、11.7%。随着过热度的升高,混晶区的范围变小,并且混晶区中的等轴晶更接近等轴晶区。表 7 是统计了铸坯中心等轴晶区的晶粒数目和平均晶粒半径随过热度的变化情况。随着过热度的增大,其晶粒数目略有减小,平均晶粒半径增大。

4.4 电磁搅拌对凝固组织的影响

电磁搅拌技术对提高等轴晶率,细化晶粒,减轻铸坯的中心疏松、偏析和缩孔等方面有重要作用。

采用改变 ProCAST 相关设置系数从而实现加入电磁搅拌的等效结

果。有以下 2 点:

(1) 增大导热系数,电磁搅拌在传热模型中起到增大液相的导热速率的作用。本文基于 Takahashi 提出的两相区模型^[12]对导热系数做出以下设置: $f_s > 0.7$ 时,导热系数不变; $f_s > 0.3$ 时,导热系数设置为原来的 5 倍; $0.3 < f_s < 0.7$ 的区间内,导热系数线性增大^[13];

表 7 不同过热度下铸坯等轴晶区晶粒统计结果

Table 7 Statistic results of grains in equiaxed regions of casting slab with different superheats of liquid

过热度 / ℃	晶粒数目	平均晶粒半径 / mm
10	1 490	1.401
15	1 492	1.398
20	1 500	1.384
25	1 470	1.442

(2) 增大形核速率。电磁搅拌可以打碎凝固前沿的树枝晶,从而提高最大形核密度。本文在设置里将 $n_{v,max} = 5 \times 10^7$ 增大为 $n_{v,max} = 6.25 \times 10^7$ ^[14]。

基于现代电磁搅拌冶金理论的“机械模型理论”及“热模型理论”来确定具体的安装位置,一般板坯是采用 S-EMS。根据实际工况,安装电磁搅拌的位置处于二冷二段出口处,距离弯月面 8 m 处。铸坯组织的模拟结果如图 6 所示。对其等轴晶率及晶粒尺寸进行统计如表 8 所示。

5 工艺优化

根据模拟的结果分析得出,降低过热度有利于扩大等轴晶区,从而提高铸坯内部质量。现场生产

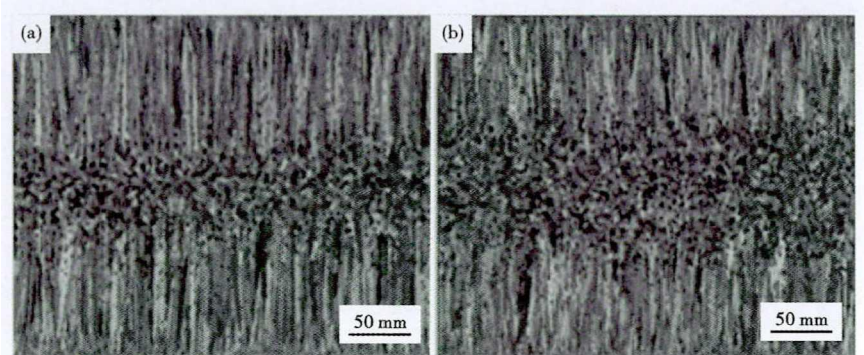


图 6 无电磁搅拌(a)和有电磁搅拌(b)铸坯组织模拟结果
Fig.6 Simulation results of casting slab structure without (a) and with (b) electromagnetic stirring

表8 无电磁搅拌(1)和有电磁搅拌(2)的铸坯等轴晶率和平均晶粒半径

Table 8 Equiaxed grain ratio and average grain radius of casting slab without (1) and with (2) electromagnetic stirring

工艺	等轴晶率/ %	平均晶粒半径/ mm
无电磁搅拌(1)	21.7	1.398
加入电磁搅拌(2)	32.3	1.175

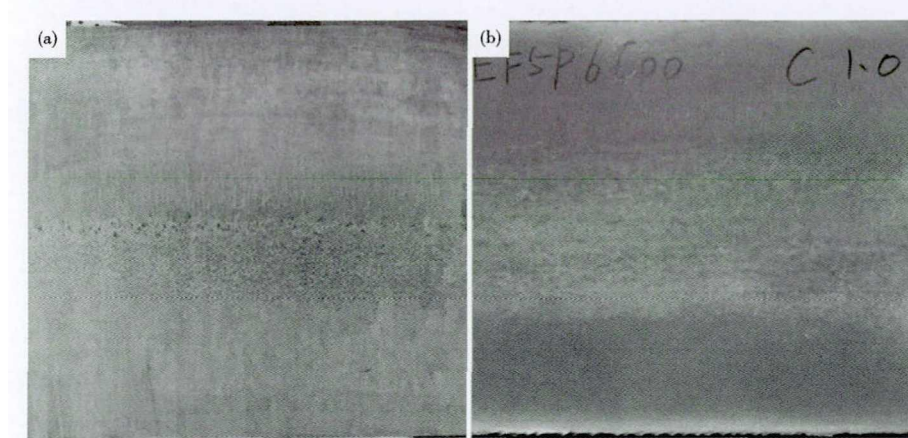


图7 优化前(a)和优化后(b)铸坯的低倍组织

Fig. 7 Macrostructure of casting slab before (a) and after (b) optimization

原浇注过热度大约为 15 °C, 经过工艺优化后将浇注过热度降低为 10 °C。取两种工艺参数下的铸坯试样进行酸洗实验, 并观察凝固组织形貌, 实验结果如图7所示。从图7可以看出, 降低过热度明显扩

大了中心等轴晶区, 改善中心偏析, 有利于提高后续终轧产品质量。

6 结论

(1) 通过 ProCAST 软件建立了板坯凝固模型, 在现场工艺条件下(过热度 15 °C、拉速 0.8 m/min、比水量 0.33 L/kg)对凝固组织进行模拟, 并与酸洗后的低倍组织进行了比较, 其晶区比例基本吻合, 模型准确可靠。

(2) 过热度增大, 其等轴晶区减少。过热度的降低可以显著改善板坯的凝固组织。拉速和二冷比水量的变化对细化凝固组织晶粒的效果不明显。加入电磁搅拌可以起到细化晶粒, 促进等轴晶生长的作用。

(3) 通过模拟的结果, 在实际生产中调整工艺参数, 把过热度从 15 °C 降低到 10 °C, 拉速为 0.8 m/min。

降低过热度明显扩大了中心等轴晶区, 改善了中心偏析。

国家自然科学基金资助项目(51774030)

参考文献

- [1] 狄国标, 刘振宇, 郝利强, 等. 海洋平台用钢的生产现状及发展趋势[J]. 机械工程材料, 2008, 32(8): 1-3.
- [2] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 144-150.
- [3] Brimacombe J K. The Challenge of Quality in Continuous Casting Processes[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 1999, 30(8): 1899-1912.
- [4] 任兵芝. 电磁搅拌大方坯连铸结晶器内电磁场与流场及温度场耦合过程数值模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [5] Gandin A C. Stochastic Modelling of Solidification Grain Structures[J]. ISIJ International, 1995, 35(6): 651-657.
- [6] Rappaz M and Gandin C A. Probabilistic Modelling of Microstructure Formation in Solidification Processes[J]. Acta Metallurgica Et Materialia, 1993, 34(1): 93-124.
- [7] Gandin C A and Rappaz M. A Coupled Finite Element-Cellular Automaton Model for the Prediction of Dendritic Grain Structures in Solidification Processes[J]. Acta Metallurgica Et Materialia, 1994, 42(7): 2233-2246.
- [8] 虞觉奇. 二元合金状态图集[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [9] 陈家祥. 钢铁冶金学(炼钢部分)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- [10] 李文超. 冶金与材料物理化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [11] Gandin C, Desbiolles J and Rappaz M, et al. A Three-Dimensional Cellular Automaton-Finite Element Model for the Prediction of Solidification Grain Structures[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30(12): 3153-3165.
- [12] Takahashi T, Kudoh M and Ichikawa K. Fluidity of the Liquid in the Solid-Liquid Coexisting Zone[J]. Materials Transactions Jim, 1980, 21(8): 531-538.
- [13] 景财良, 许志刚, 王 郢, 等. 72A 帘线钢小方坯凝固组织的 CAFE 法模拟[J]. 铸造技术, 2011, 32(6): 849-853.
- [14] Hou Z, Jiang F and Cheng G. Solidification Structure and Compactness Degree of Central Equiaxed Grain Zone in Continuous Casting Billet Using Cellular Automaton-Finite Element Method[J]. ISIJ International, 2012, 52(7): 1301-1309.

邬浩天(1996-), 男, 硕士, 2021年1月北京科技大学硕士毕业, 连铸坯的内部质量研究。E-mail: wuhaotian100@163.com

收稿日期: 2020-10-26