

连铸工艺参数对 20CrMnTi 齿轮钢 150 mm × 150 mm 铸坯凝固组织影响数值模拟和生产应用

史建凯¹ 岳峰¹ 田儒良¹ 郑力宁² 翟万里² 林鹏²

(1 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心,北京 100083; 2 江苏沙钢集团淮钢特钢有限公司总工办,淮安 223002)

摘要 为改善 20CrMnTi 钢小方坯凝固组织,基于 ProCAST 软件中的 CAFE 模型,对其凝固组织进行数值模拟,研究了不同钢水过热度、铸坯拉速、二冷比水量对凝固组织的影响。模拟结果表明,降低钢水过热度、提高铸坯拉速、降低二冷比水量均可达到增大铸坯等轴晶率和细化晶粒的目的,其中过热度对其影响最大。过热度每降低 10 ℃,等轴晶率平均增加 3.7%;拉速每增加 0.1 m/min,铸坯等轴晶率平均增加 1.8%;比水量每降低 0.1 L/kg,铸坯等轴晶率平均增加 1.65%。生产应用表明,钢水过热度 30 ℃时,当拉速由原 2.2 m/min 降低至 2.1 m/min,二冷比水量由 0.6 L/kg 提高至 0.7 L/kg,铸坯中心疏松明显减少。

关键词 20CrMnTi 齿轮钢 小方坯 凝固组织 数值模拟

Numerical Simulation of Effect of Continuous Casting Process Parameters on Solidification Structure of 20CrMnTi Gear Steel 150 mm × 150 mm Billet and Production Application

Shi Jiankai¹, Yue Feng¹, Tian Ruliang¹, Zheng Lining², Zhai Wanli² and Lin Peng²

(1 Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083; 2 Chief Engineer's Office, Jiangsu Shagang Group Huai Steel Special Steel Corporation, Huai'an 223002)

Abstract In order to improve the solidification structure of steel 20CrMnTi billet, based on the CAFE model in ProCAST software, the solidification structure is numerically simulated, and the effects of different superheat of molten steel, casting speed of billet and secondary cooling water ratio on the solidification structure are studied. The simulation results show that with decreasing the superheat of molten steel, and increasing cast speed, and decreasing the specific water amount of secondary cooling can increase the equiaxed grain ratio and refine the grain size of the billet, and the superheat of molten steel has the most influence on it; the equiaxed grain rate increases by 3.7% with the decrease of superheat by 10 ℃; the equiaxed grain ratio of the casting billet increases by 1.8% on average when the cast speed increases by 0.1 m/min; and the equiaxed grain ratio of the billet increases by 1.65% when the specific water amount decreases by 0.1 L/kg. Production application shows that with superheat of molten steel 30 ℃, as cast speed decreases from original 2.2 m/min to 2.1 m/min, secondary cooling specific water amount increases from 0.6 L/kg to 0.7 L/kg, the billet center porosity obviously decreases.

Material Index 20CrMnTi Gear Steel, Billet, Solidification Structure, Numerical Simulation

齿轮钢 20CrMnTi 在生产制造各种齿轮产品的材料中占有主要地位^[1-2]。研究表明,铸坯的凝固组织与偏析密切相关,通过提高铸坯的等轴晶率、细化晶粒可以有效减轻偏析,改善铸坯的内部质量^[3-4]。

目前数值模拟大致分为三大类:确定性模拟法、随机性模拟法和相场法^[5-7]。其中随机性模拟又包括蒙特卡洛法(MCM)、界面跟踪法(FT)、元胞自动机法(CA)。元胞自动机法由于比较全面的考虑了影响枝晶生长的各种物理机制且其算法简单,计算效率高,成为目前所采用的主流模拟方法。本文采

用元胞自动机(CA)与有限元(FE)耦合的 CAFE 模型,基于 ProCAST 软件对 150 mm × 150 mm 齿轮钢 20CrMnTi 凝固组织进行模拟。

1 CAFE 模型

1.1 异质连续形核

CAFE 模型所应用形核模型是异质连续形核,用连续但非离散分布函数 $dn/d(\Delta T)$ 来确定,见式(1)。

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

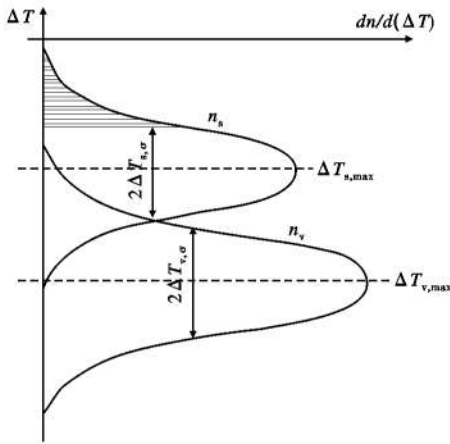


图 1 形核高斯分布图
Fig. 1 Gaussian distribution of nucleation

式中: ΔT_{max} - 平均形核过冷度; ΔT_{σ} - 形核过冷度标准方差; n_{max} - 正态分布 0 到 ∞ 积分的最大形核密度。

金属溶体在凝固过程中进行异质形核时,用如图 1 所示的高斯分布来描述。

图 1 中, $\Delta T_{v,max}$ 为最大体形核过冷度; $\Delta T_{s,max}$ 为最大面形核过冷度; $\Delta T_{s,\sigma}$ 为面形核过冷度标准方差; $\Delta T_{v,\sigma}$ 为体形核过冷度标准方差。

1.2 晶粒长大模型

在合金的凝固过程中,枝晶尖端生长动力学受动力学过冷度和成分过冷度的双重影响。枝晶尖端生长的总过冷度 ΔT 由式(2)计算可得^[8]。

$$\Delta T = \Delta T_c + \Delta T_l + \Delta T_r + \Delta T_k \quad (2)$$

式中: ΔT_c 、 ΔT_l 、 ΔT_r 、 ΔT_k 分别为成分过冷度、热力学过冷度、固液界面曲率过冷度、生长动力学过冷度。但对大部分合金, ΔT_l 、 ΔT_r 、 ΔT_k 都很小,通常忽略不计^[9]。基于上述条件,采用 Kurz 提出的 KGT 模型用来计算柱状晶和等轴晶的长大速度^[10-11]。在实际模拟过程中,为了减少计算模拟时间,提高效率,则对 KGT 模型进行线性拟合处理,得到枝晶尖端的生长速度 ν 与过冷度 ΔT 间的多项式,如式(3)所示。

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

式中: a_2 、 a_3 - 拟合多项式的系数; ΔT - 枝晶尖端生长总过冷度。

2 20CrMnTi 钢凝固组织模拟

2.1 模拟参数确定

以钢厂实际生产的 20CrMnTi 钢(表 1)为基础进行数值模拟。将化学成分输入 ProCAST 软件中,通过 Lever 定律模型计算可得到 20CrMnTi 钢的液相线温度、固相线温度见表 2。生产 20CrMnTi 钢 150 mm × 150 mm 方坯的弧形连铸机半径为 10.3 m,工艺参数如表 2 所示。铸坯在结晶器中的传热根据公式 $Q = 2680000 - 201327\sqrt{t}$ ($t = 1 \sim 27$ s) 计算所得;在二冷各区传热根据公式 $h = a \cdot W^n$ 计算所得,式中 h 为综合传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; a 、 n 为常数,通过模型的校正来确定, W 为二冷水的水流密度, $L/(m^2 \cdot s)$,计算结果如表 3 所示;铸坯在辐射区的传热 $\varepsilon = 0.8$ 。根据表 1 ~ 表 3 的参数和计算数据,应用薄片移动边界法^[12],通过 ProCAST 软件就可模拟得到凝固过程中的温度场,对模拟得到的温度场根据现场实测铸坯表面温度进行合理性验证,如表 4 所示。由表 4 可知,模拟结果与实测结果误差均在 2% 以内。

在温度场的基础上,运用 ProCAST 软件中的 CAFE 模型对 20CrMnTi 钢凝固组织进行模拟。模拟过程中 Gibbs-Thompson 系数 Γ 取 $3 \times 10^{-7} m \cdot K^{13}$,面形核参数 $T_{s,max} = 3$, $T_{s,\sigma} = 0.1$, $n_{s,max} = 3 \times 10^5 m^{-2}$;体形核参数 $T_{v,max} = 2.5$, $T_{v,\sigma} = 0.1$, $n_{v,max} = 2 \times 10^8 m^{-3}$ (s 代表面形核, ν 代表体形核)。20CrMnTi 钢的主要溶质元素及相应参数如表 5 所示^[14-15]。经 ProCAST 计算可得枝晶尖端的生长动力学 $a_2 = 0$, $a_3 = 4.03 \times 10^{-6} m \cdot s^{-1} \cdot K^{-3}$ 。实际生产 20CrMnTi 过程中连铸机施加了电流为 340 A,频率为 6 Hz 的结晶器电磁搅拌,在模拟时通过改变液相区的导热系数和增加体形核来等效电磁搅拌^[16]。

2.2 模拟结果验证

表 1 模拟 20CrMnTi 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical Composition of simulated 20CrMnTi steel / %

C	Cr	S	P	Si	Mn	Ti
0.20	1.10	0.020	0.010	0.26	1.00	0.05

表 2 模拟 20CrMnTi 钢的生产工艺参数

Table 2 Production process parameters of simulated 20CrMnTi steel

液相线温度/ °C	固相线温度/ °C	过热度/ °C	拉速/ (m · min ⁻¹)	结晶器		二冷区水流量/(L · min ⁻¹)		
				进出水温差/°C	冷却水流量/(L · min ⁻¹)	足辊段	活动段	固定段
1508	1461	30	2.2	7	2000	88	92	44

表 3 模拟的冷却参数和作用时间

二冷区	长度/mm	作用时间/s	换热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
一区	300	8	856.3
二区	1750	48	745.5
三区	2400	65	280.7

表 4 模拟与实测铸坯表面温度对比

Table 4 Comparison between simulated and experimental surface temperature of cast billet

项目	实测结果/℃	模拟结果/℃	误差/%
二冷一区末端	1 088	1 068.9	1.76
二冷二区末端	1 062	1 053.6	0.79
二冷三区末端	1 058	1 037.8	1.91
进拉矫机前	1 013	1 002.3	1.06

在铸坯上取 150 mm × 150 mm × 30 mm 试样经铣床加工后,将 20% 盐酸水溶液加热到 70 ℃,酸洗 30 min 待凝固组织显现后进行拍照如图 2(a) 所示,模拟结果如图 2(b) 所示。

经测算铸坯的等轴晶率为 23.5%,模拟结果等轴晶率为 24.2%,误差为 2.9%。

3 数值模拟结果与讨论

采用 ProCAST 软件中的 CAFE 模型,分别模拟了不同钢水过热度、铸坯拉速、二冷比水量连铸工艺参数下 20CrMnTi 钢小方坯凝固组织。

3.1 钢水过热度对凝固组织影响

在拉速 2.2 m/min,二冷比水量 0.6 L/kg 下,模拟了过热度分别为 10 ℃、20 ℃、30 ℃、

表 5 20CrMnTi 钢主要元素对应参数

Table 5 Parameters corresponding to main elements in 20CrMnTi steel

元素	元素质量分数/%	液相线斜率	分配系数	扩散系数/10 ⁻⁹
C	0.20	-82.1	0.003	11
Cr	1.10	-1.66	0.911	3.3
Mn	1.00	-5.25	0.716	2.4
Ti	0.05	-13.8	0.269	0.4
Si	0.26	-16.0	0.594	1.4
P	0.01	-29.3	0.262	4.6
S	0.02	-39.8	0.044	3.5

40 ℃ 铸坯的凝固组织情况。由图 3(a) 可知,铸坯的等轴晶率随着过热度的增加而降低,由过热度 10 ℃ 时的 31.4%, 逐次降低到过热度 40 ℃ 时的 20.4%。过热度每增加 10 ℃,等轴晶率平均降低 3.7%。钢水过热度主要影响铸坯凝固前沿的温度梯度,在低过热度浇注时,凝固前沿的温度梯度降低,抑制了柱状晶的生长,促使了柱状晶提前向等轴

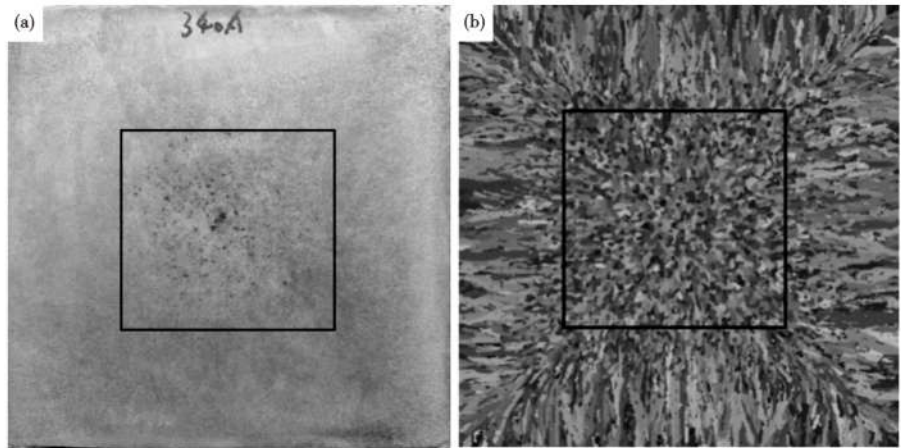


图 2 试验 (a) 和模拟 (b) 20CrMnTi 钢 150 mm × 150 mm 坯低倍等轴晶区组织对比
Fig. 2 Comparison between experimental (a) and simulated (b) equiaxed macro-structure in 150 mm × 150 mm billet of 20CrMnTi steel

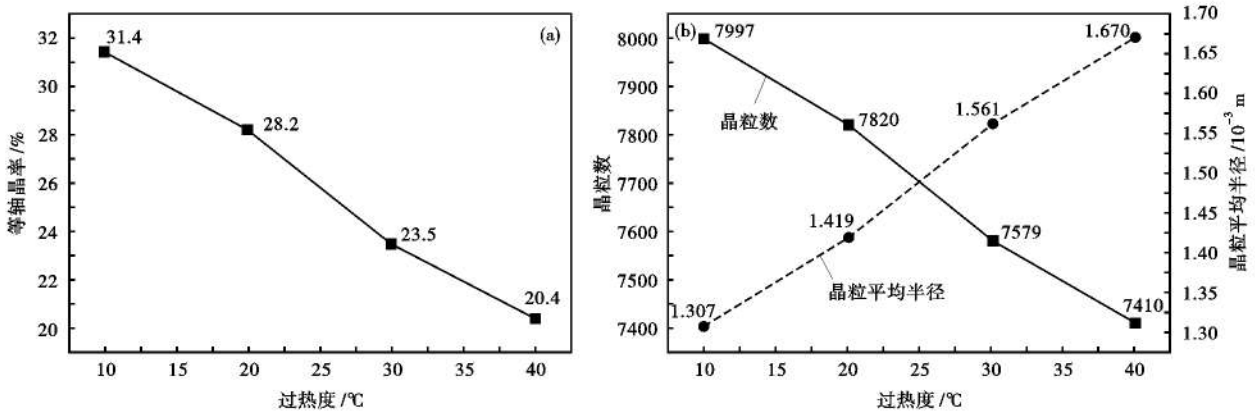


图 3 钢水过热度对小方坯的等轴晶率 (a) 和晶粒尺寸和数量 (b) 的影响
Fig. 3 Effect of degree of superheat of molten steel on billet equiaxed zone ratio (a), and grain size and number (b)

晶转变,从而增加了铸坯的等轴晶率。由图 3(b)可知,当过热度依次增加时,晶粒平均半径也随之增加,晶粒数逐渐降低。钢水过热度过低会发生水口堵塞,使浇铸中断,同时不利于夹杂物的上浮,影响铸坯的质量。综合考虑,将钢水过热度控制在 15 ~ 30 ℃ 较为合理。

3.2 拉速对凝固组织影响

在过热度为 30 ℃、二冷比水量为 0.6 L/kg 下,模拟了铸坯拉速分别为 2.0、2.1、2.2、2.3、2.4 m/min 铸坯的凝固组织情况。由图 4(a)可知,铸坯的等轴晶率随着拉速的增加而增加,由拉速 2.0 m/min 时的 19.5%,增加到拉速 2.4 m/min 时的 26.7%,拉速每增加 0.1 m/min,铸坯等轴晶率平均增加 1.8%。当拉速增加时,铸坯在二冷区停留时间缩短,则冷却强度相对降低,同时铸坯表面温度增加幅度大于中心温度增加幅度,因此降低了铸坯凝固前沿温度梯度,促进了等轴晶的形成^[17]。由图 4(b)可知,当拉速增加时,晶粒数逐渐增加,晶粒平均半径减小。当拉速过高时,导致出结晶器的初生

坯壳过薄,容易使坯壳被拉裂造成漏钢事故。并且当拉坯应力大于裂纹临界应力会产生裂纹。综合考虑,将拉速控制在 2.1 ~ 2.3 m/min。

3.3 二冷比水量对凝固组织影响

在过热度为 30 ℃、拉速为 2.2 m/min 条件下,模拟了二冷比水量分别为 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 L/kg 铸坯的凝固组织情况。由图 5(a)可知,铸坯的等轴晶率随着比水量的增加而降低,由比水量 0.5 L/kg 时的 25.2%,降低到比水量 0.9 L/kg 时 18.6%,比水量每增加 0.1 L/kg,铸坯等轴晶率平均降低 1.65%。随着冷却强度的增加,铸坯表面温度降低,凝固前沿的温度梯度增大,促进了柱状晶的生长,导致等轴晶率降低。由图 5(b)可知,当比水量增加时,晶粒数逐渐减少,晶粒平均半径增加。因此,降低比水量也可以细化晶粒。但当比水量过低时,会降低出结晶器的初生坯壳厚度,容易使铸坯发生鼓肚缺陷。综合考虑,将二冷比水量控制在 0.5 ~ 0.7 L/kg。

3.4 最佳工艺条件

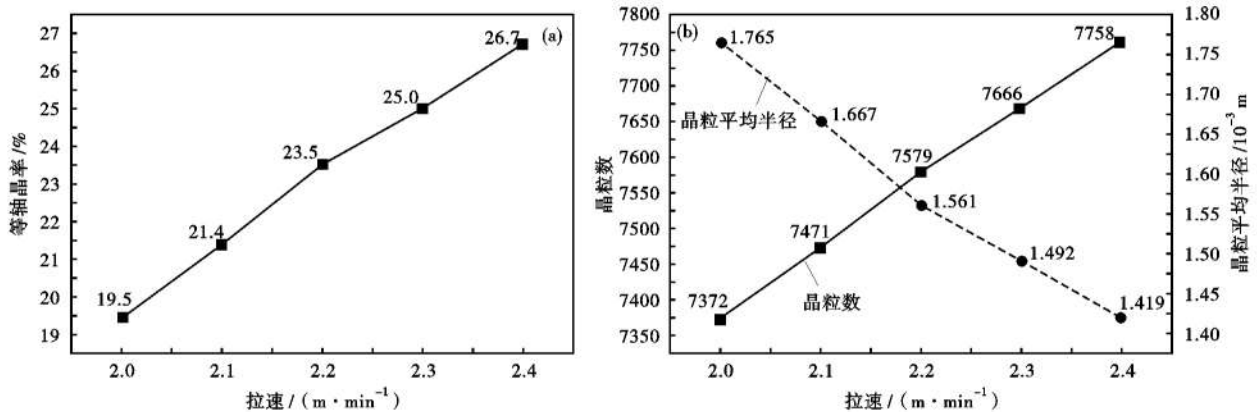


图 4 拉速对小方坯等轴晶率(a)和晶粒尺寸和数量(b)的影响
Fig. 4 Effect of casting speed on billet equiaxed zone ratio (a), and grain size and number (b)

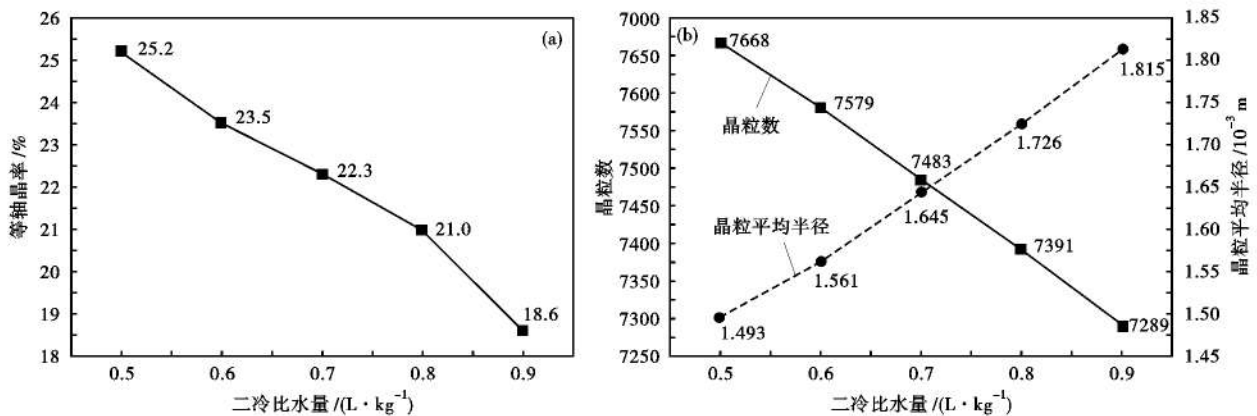


图 5 二冷比水量对小方坯等轴晶率(a)和晶粒尺寸和数量(b)的影响
Fig. 5 Effect of specific water flow of secondary cooling on billet equiaxed zone ratio (a), and grain size and number (b)

综上模拟结果及现场实际情况,具体工艺条件如表 6 所示。由试验结果可得,采用改进后新工艺参数后,铸坯的低倍质量优于原工艺,中心疏松明显减少(图 6)。

4 结论

(1) 建立了 150 mm × 150 mm 方坯 20CrMnTi 齿轮钢形核和晶粒长大模型,基于 ProCAST 软件模拟了不同工艺参数对其凝固组织影响,通过现场低倍试验结果对模拟结果检验,其误差在 3% 以内。

(2) 模拟结果表明,150 mm × 150 mm 方坯 20CrMnTi 齿轮钢通过降低钢水过热度、提高铸坯拉

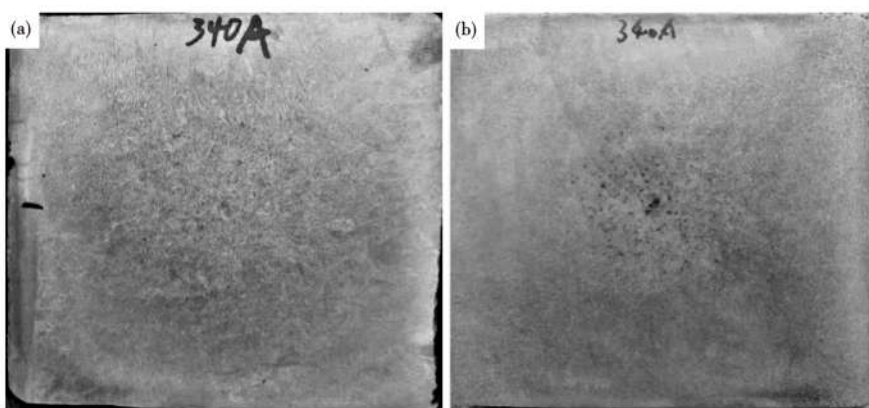


图 6 新工艺(a)和原工艺(b)铸坯低倍组织对比

Fig. 6 Comparison of billet macrostructure between by improved (a) and original (b) process

表 6 改进工艺和原工艺连铸参数

Table 6 Casting parameters of improved and original process

工艺	过热度/ ℃	拉速/ (m · min ⁻¹)	二冷比水量/ (L · kg ⁻¹)
新工艺	30	2.1	0.7
原工艺	30	2.2	0.6

参考文献

- [1] Zhang F M, Mao Q W and Mei C H, et al. Dome Combustion Hot Blast Stove for Huge Blast Furnace[J]. Journal of Iron & Steel Research International, 2012, 19(9): 1-7.
- [2] 刘 威, 李京社, 杨宏博, 等. 供氧压力对顶吹转炉内流场影响数值模拟[J]. 中国冶金, 2014(12): 19-22, 26.
- [3] 李向荣. MH-310 型烧嘴在本钢炼钢厂板坯火焰清理机的应用[J]. 连铸, 2014, 39(5): 32-36.
- [4] 李林波, 曾文斌. CFD 数值模拟技术在冶金中的应用[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(12): 1-4.
- [5] 赵莉萍, 李 钊, 袁 雪, 等. 成分对 CAFE 法凝固组织模拟计算的影响[J]. 铸造技术, 2015, 36(2): 407-409.
- [6] Juric D and Tryggvason G. A front-Tracking Method for Dendritic Solidification[J]. Journal of Computational Physics, 1996, 123(1): 127-148.
- [7] Caginalp G and Fife P. Phase Field Methods for Interfacial Boundaries[J]. Physical Review B: Condensed Matter, 1986, 33(11): 7792-7794.
- [8] Rappaz M and Gandin C A. Probabilistic Modelling of Microstructure Formation in Solidification Processes[J]. Acta Metallurgical and Materialia, 1993, 34(1): 93-124.
- [9] Ignaszak Z, Hajkowski M and Hajkowski J. Prediction of Dendritic Microstructure Using the Cellular Automaton-finite Element Method for Hypoeutectic Al-Si Alloys Castings[J]. Materials Science, 2006, 12(2): 124-126.
- [10] Kurz W, Giovanola B and Trivedi R. Theory of Microstructural Development during Rapid Solidification[J]. Acta Metal Mater, 1986, 34(5): 823-830.
- [11] Kurz W and Fisher D J. Fundamentals of Solidification[M]. Switzerland: Trans Tech Publications, 1998: 63.
- [12] 张志祥, 闵 义, 姜茂发. 37Mn5 连铸圆坯凝固过程数学模拟[J]. 东北大学学报, 2010, 31(7): 966-969.
- [13] Gandin C A, Desbiolles J L 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.
- [14] 虞觉奇. 二元合金状态图[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987: 366.
- [15] 陈家祥. 钢铁冶金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 311.
- [16] Yamazaki M, Natsume Y and Harada H, et al. Numerical Simulation of Solidification Structure Formation during Continuous Casting in Fe-0.7mass% C Alloy Using Cellular Automaton Method[J]. ISIJ International, 2006, 46(6): 903-908.
- [17] 孙 涛, 岳 峰, 郭 春, 等. 连铸工艺参数对大圆坯凝固组织影响的数学模拟[J]. 炼钢, 2015, 31(6): 26-27.

速、降低二冷比水量均可达到增大等轴晶率和细化晶粒的目的;其中,钢水过热度对其影响较大,拉速和二冷比水量影响较小;过热度每降低 10 ℃,铸坯等轴晶率平均增加 3.7%;拉速每增加 0.1 m/min,铸坯等轴晶率平均增加 1.8%;比水量每降低 0.1 L/kg,铸坯等轴晶率平均增加 1.65%。

(3) 通过采用过热度 30 ℃、拉速 2.1 m/min、二冷比水量 0.7 L/kg 的新工艺后,铸坯的中心疏松得到显著改善,提高了铸坯质量。

史建凯(1994-),男,硕士生(北京科技大学),2019 年江西理工大学(本科)毕业,连铸坯凝固组织和偏析控制。

E-mail: 377923381@qq.com

收稿日期: 2021-07-24