

HRB400 钢连铸坯凝固组织数值模拟研究

刘振民^{1,2*}, 段韶青^{1,2}, 张梦飞³, 王玉帅⁴, 苗芳³, 吕征⁵

1.山西宏达钢铁集团有限公司, 山西 河津 043300

2.山西宏达钢铁有限公司, 山西 河津 043300

3.中北大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030051

4.中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051

5.河北工程大学机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038

[摘要]HRB400 钢是建筑工程领域常用的低碳钢, 连铸是其生产过程中的关键环节, 连铸坯凝固组织对后续加工及最终产品性能具有重要影响。文中基于 ProCAST 软件的 CAFE (元胞自动机) 方法对 HRB400 钢连铸过程中的凝固组织演化进行数值模拟, 研究了钢水过热度 and 冷却水强度对铸坯凝固组织的影响规律。结果表明, 降低过热度有利于减小固液界面前沿温度梯度, 促进中心等轴晶形成; 当过热度由 40℃降低至 10℃时, 等轴晶比例由 57.3%提高至 65.5%。适当降低冷却水强度也有利于抑制柱状晶过度生长, 改善铸坯组织均匀性。研究结果可为 HRB400 钢连铸工艺优化和凝固组织调控提供理论依据。

[关键词]HRB400 钢; 连铸; 数值模拟; 凝固组织

DOI: 10.33142/ect.v4i4.19524

中图分类号: TG249.7

文献标识码: A

Numerical Simulation Study on Solidification Microstructure in HRB400 Steel Continuous Casting Billet

LIU Zhenmin^{1,2*}, DUAN Shaoqing^{1,2}, ZHANG Mengfei³, WANG Yushuai⁴, MIAO Fang³, LYU Zheng⁵

1. Shanxi Hongda Iron & Steel Group Co., Ltd., Hejin, Shanxi, 043300, China

2. Shanxi Hongda Iron & Steel Co., Ltd., Hejin, Shanxi, 043300, China

3. School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi, 030051, China

4. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi, 030051, China

5. School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei, 056038, China

Abstract: HRB400 steel is a low-carbon steel commonly used in construction engineering, and continuous casting is a key stage in its production process. The solidification microstructure of continuous casting billets has an important influence on subsequent processing and the final properties of steel products. In this study, the solidification microstructure evolution of HRB400 steel during continuous casting was numerically simulated using the CAFE method based on ProCAST software. The effects of molten steel superheat and cooling water intensity on the solidification microstructure of the billet were investigated. The results show that reducing the superheat is beneficial for decreasing the temperature gradient ahead of the solid-liquid interface and promoting the formation of center equiaxed grains. When the superheat is reduced from 40 °C to 10 °C, the fraction of equiaxed grains increases from 57.3% to 65.5%. In addition, appropriately decreasing the cooling water intensity can also suppress excessive growth of columnar grains and improve the microstructural uniformity of the billet. The results provide a theoretical basis for process optimization and solidification microstructure control in the continuous casting of HRB400 steel.

Keywords: HRB400 steel; continuous casting; numerical simulation; solidification microstructure

引言

HRB400 钢是建筑工程和基础设施领域广泛使用的低碳钢, 具有较好的强度、塑性及综合服役性能。在

HRB400 钢生产过程中连铸是其生产的重要环节之一, 连铸坯凝固组织不仅决定铸坯内部组织均匀性和中心质量, 而且对后续轧制过程以及最终产品性能具有重要影响。

因此,开展 HRB400 连铸坯凝固组织研究,对于优化连铸工艺、提升产品质量具有重要意义。

连铸凝固过程复杂,涉及传热、相变、溶质再分配以及晶粒形核和长大等多个复杂动态过程,受钢水成分、过热度、拉坯速度、二冷强度和保护渣性能等因素影响,稍有不慎便会产生严重缺陷^[1-3]。近年来,随着计算材料学和凝固理论的发展,数值模拟技术已在金属凝固组织研究中得到成功应用,为连铸组织演化规律分析和工艺参数优化提供了有效手段^[4-7]。目前,研究者已利用自动机—有限元耦合方法(CAFE 方法)对多种钢坯连铸过程的凝固组织开展了研究,并取得了成功应用^[8,9]。高向宙等^[10]采用 CAFE 法对 Q345B 宽厚板连铸凝固末端铸坯断面微观组织进行了模拟,通过模拟计算研究了过热度与拉坯速度对柱状晶和等轴晶比例的影响,并总结出过热度与拉坯速度对凝固组织晶粒尺寸的影响规律。温巨文等^[11]基于 CAFE 方法研究了低碳钢 Q235 成分变化对凝固组织的影响,指出合理成分设计会引起组织中等轴晶率的变化。相关研究表明,降低过热度有利于扩大中心等轴晶区、提高等轴晶比例;而增大水冷强度会增强凝固前沿温度梯度,促进柱状晶生长,从而不利于中心等轴晶形成^[12,13]。

目前,关于 HRB400 钢连铸坯凝固组织的数值模拟研究目前仍相对较少。基于此,本文以 HRB400 钢连铸坯为研究对象,采用 ProCAST 软件中的 CAFE 模块建立凝固组织数值模拟模型,重点研究钢水过热度与冷却水流速对铸坯横截面凝固组织的影响规律,以期对 HRB400 钢连铸生产中的组织调控和工艺优化提供理论依据。

1 数值模拟模型和计算过程:

1.1 数值模拟模型

凝固组织演变过程主要涉及形核和长大两个阶段。其中,形核过程决定了晶粒的初始数量、空间分布及晶粒细化程度,是凝固组织形成的基础;长大过程则决定了晶粒的生长方向、形貌特征及最终组织类型,是柱状晶、等轴晶及柱状晶—等轴晶转变形成的关键^[14-17]。

(1) CAFE 形核模型

采用基于高斯分布的连续形核模型描述晶粒密度随过冷度的变化规律,具体如公式(1)和公式(2)所示:

$$n(\Delta T) = \int_0^{\Delta T} \frac{dn}{d(\Delta T)} d(\Delta T) \quad (1)$$

(2)

其中, n 为晶粒密度, dn 晶粒密度的变化量; $d(\Delta T)$ 表示某一过冷度下晶粒密度; $n_{\max}$ 为最大形核密度; ΔT 为过冷度; $\Delta T_{\max}$ 为最大过冷度; ΔT_0 为形核过冷度标准

方差。

(2) 枝晶生长的动力学模型

凝固过程中,枝晶生长受枝晶尖端前沿总过冷度控制。枝晶尖端总过冷度主要由成分过冷、热过冷、动力学过冷和曲率过冷共同组成,可表示为:

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

式中: ΔT_c 为成分过冷; ΔT_t 为热力学过冷; ΔT_k 为生长动力学过冷; ΔT_r 为固-液界面曲率过冷。对于大多数的金属材料而言,成分过冷度为主要影响因素,可以用 KGT 模型计算枝晶尖端生长速度,如公式(4)所示:

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

式中: $v(\Delta T)$ 为时间步长 ΔT 内枝晶尖端生长速度; a_2 , a_3 为生长动力学参数; ΔT 为过冷度。

1.2 数值模拟过程:

以某厂生产的 HRB400 连铸坯为研究对象,其化学成分见表 1。根据连铸坯实际生产条件建立数值模拟模型,如图 1 所示,铸坯截面尺寸为 400mm×200mm。采用稳态数值模拟方法,模型网格划分采用四面体单元,模拟过程中所涉及的材料热物性参数如下:固相线温度 1439℃,液相线温度 1505℃,结晶潜热 270J/g,导热系数 41W/(m·K)。在组织场模拟过程中,设置的体形核最大过冷度 $\Delta T_{v\max}$ 为 2K,面形核最大过冷度 $\Delta T_{s\max}$ 为 1K。体过冷度的标准方差 ΔT_{v0} 为 1.5K,面过冷度的标准方差 ΔT_{s0} 为 0.5K。体形核最大密度 $n_{v\max}$ 为 $1 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$,面形核最大密度 $n_{s\max}$ 为 $1 \times 10^7 \text{ m}^{-2}$ 。枝晶尖端生长动力学系数 $a_2 = 3.03 \times 10^{-7}$, $a_3 = 2.17 \times 10^{-6}$ 。

表 1 HRB400 钢成分(wt.%)

元素名称	C (%)	Si (%)	Mn (%)	V (%)	P、S (%)
HRB400 钢	0.23~0.25	0.45~0.55	1.45~1.55	0.030~0.050	≤0.045

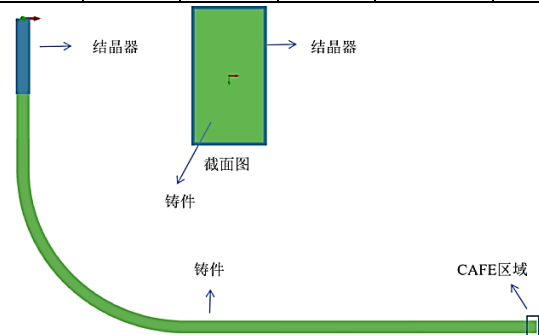


图 1 连铸坯模型

2 数值模拟结果

2.1 凝固过程

如图 2 所示, HRB400 钢连铸坯截面在凝固过程。红

色区域表示液相，白色区域表示固相。凝固初期，铸坯截面基本处于液态，随着冷却进行，靠近铸坯表面的钢液首先发生凝固形成初生凝固壳。凝固中期，凝固壳不断增厚，固液界面由铸坯表面逐渐向中心推进。凝固后期，铸坯大部分区域已转变为固相，仅心部仍保留少量液相，中心液相区逐渐收缩。凝固末期，残余液相最终完全凝固。

2.2 过热度对凝固组织的影响

如图 3 所示，可以看出随着钢水过热度增加，柱状晶区占比增加，过热度降低，铸坯中心等轴晶区占比增加，当过热度由 40℃降低至 10℃时，中心等轴晶比例由 57.3%提高至 65.5%。过热度增加会增加凝固前沿温度梯度，从而有利于柱状晶沿逆热流方向持续生长，抑制中心等轴晶形成；所以适当降低过热度能够有效改善铸坯凝固组织。

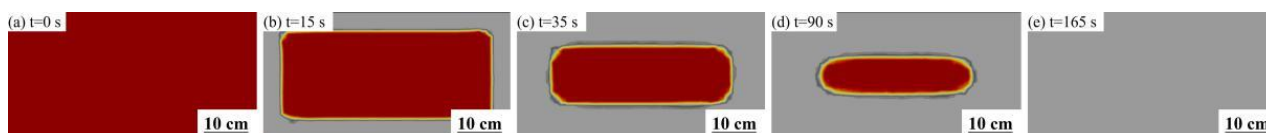


图 2 凝固过程

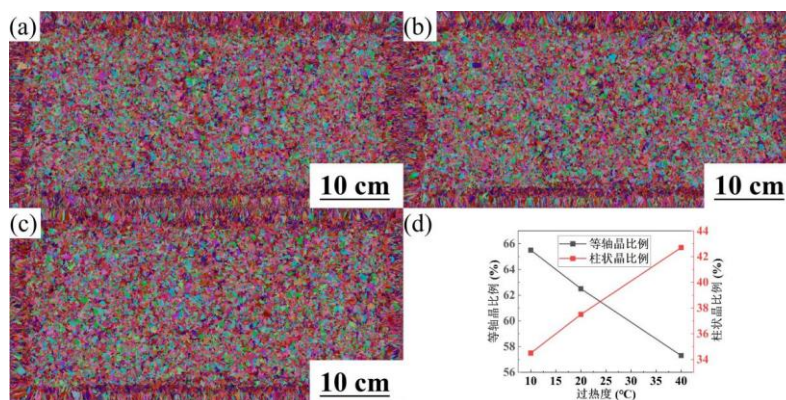


图 3 过热度与等轴晶柱状晶比例的关系

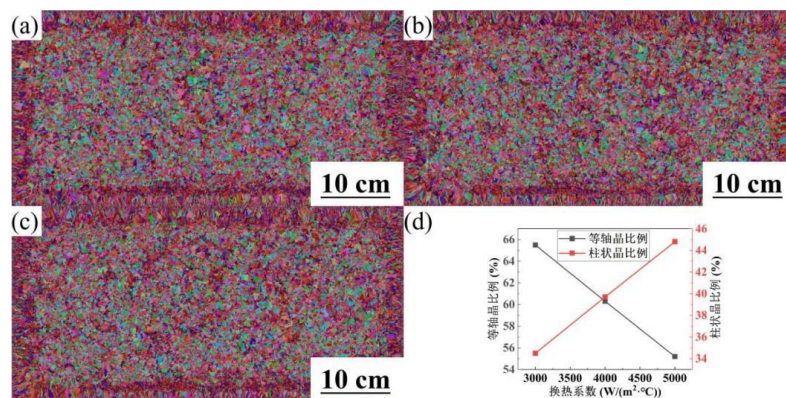


图 4 冷水强度与等轴晶柱状晶比例的关系

2.3 冷却水强度对凝固组织的影响

冷却水强度对凝固组织的影响主要体现在其对结晶器界面换热系数的调节作用。根据相关经验关系，可将冷却水强度等效换算为结晶器与铸坯之间的界面换热系数。如图 4 所示，随着冷却水强度提高，界面换热系数相应增大；当界面换热系数由 3000W/(m²·K)增加至 5000W/(m²·K)时，柱状晶区比例由 34.5%提高至 45.8%。其原因在于，冷却水强度增加会增强结晶器与铸坯之间的换热能力，提高铸坯表面散热速率，进而增大表层与中心区域之间的温度梯度，从而有利于柱状晶沿逆热流方向稳定生长，而不利于心部等轴晶形成。因此，适当降低冷却水强度有利于改善 HRB400 钢连铸坯凝固组织的均匀性；但冷却强度过低又可能影响坯壳正常生长及连铸过程稳定性，因此其参数取值仍需结合实际生产条件合理确定。

3 结论

(1) HRB400 钢连铸坯在凝固过程中形成了典型的表层细晶区、柱状晶区和中心等轴晶区。

(2) 随着过热度降低,柱状晶区占比减小,中心等轴晶区占比增加;当过热度由 40℃降低至 10℃时,中心等轴晶比例由 57.3%提高至 65.5%。适当降低过热度有利于减小凝固前沿温度梯度,促进中心等轴晶形成,改善铸坯凝固组织。

(3) 冷却水强度影响结晶器与铸坯之间的界面换热系数调控凝固组织。随着冷却水强度提高,界面换热系数增大,柱状晶区比例增加;当界面换热系数由 3000W/(m²·K)增加至 5000W/(m²·K)时,柱状晶区比例由 34.5%提高至 45.8%。为减少柱状晶区占比提高等轴晶比例,可适当降低冷却水强度,以此改善 HRB400 钢连铸坯组织均匀性。

基金项目:河津市科学基金(202403),河北省青年科学基金项目(E2023402114)。

[参考文献]

- [1]杨建华,崔贺楠,高建文,等.55SiCrA 弹簧钢大方坯连铸多物理场传输行为数值模拟[J].连铸,2025,44(6):132-144.
- [2]王君天,闫江辉,潘水军,等.方坯连铸结晶器内钢水的数值模拟与浸入式水口改进[J].炼钢,2026,42(1):38-47.
- [3]朱国明,喻林,赵培林,等.板坯连铸全流程铸流三维热力耦合模型及应用[J].钢铁,2025,60(11):95-111.
- [4]高向宙,李京社,杨树峰.Q345B 宽厚板微观组织优化数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(11):3991-3998.
- [5]许庆彦,柳百成.铸造合金凝固组织的计算机模拟与预测[J].稀有金属材料与工程,2003(6):401-406.
- [6]郑艳,梁娜,刘兆武,等.连铸坯凝固组织的数值模拟[J].连铸,2012(3):8-11.
- [7]伍帅,岳峰,魏勇,等.连铸工艺参数对高碳钢小方坯凝固

组织的影响[J].铸造技术,2017,38(11):2687-2691.

- [8]鲁素玲,李小勇,余慧,等.双辊薄带连铸温度场与凝固组织数值模拟研究[J].河北科技大学学报,2023,44(2):186-194.
 - [9]李继红,徐蔼彦,汪强,等.基于元胞自动机法模拟凝固过程微观组织的研究进展[J].热加工工艺,2014,43(15):16-23.
 - [10]高向宙,李京社,杨树峰.Q345B 宽厚板微观组织优化数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(11):3991-3998.
 - [11]温巨文,朱立光,张元杰,等.基于 CAFE 法钢的成分对低碳钢凝固组织的影响[J].钢铁钒钛,2018,39(1):130-135.
 - [12]鲁素玲,李江南,郭志红,等.GCr15 轴承钢方坯连铸凝固组织数值模拟研究[J].特种铸造及有色合金,2025,45(2):208-214.
 - [13]任春节,冷永磊,尹修刚,等.φ800mm 大断面连铸圆坯凝固传热和凝固组织模拟[J].连铸,2024(6):21-30.
 - [14] Pan Q H, Jin W, Huang S Z, et al. Simulation and study of influencing factors on the solidification microstructure of Hazelett continuous casting slabs using CAFE model [J]. Materials,2024(17):1869.
 - [15] Rappaz M, Gandin Ch A. Probabilistic modelling of microstructure formation in solidification processes [J]. Acta Metallurgica et Materialia,1993,41(2):345-360.
 - [16] Rappaz M, Gandin Ch A, Desbiolles J L, et al. Prediction of grain structures in various solidification processes [J]. Metallurgical and Materials Transactions A,1996,27(3):695-705.
 - [17] Kurz W, Giovanola B, Trivedi R. Theory of microstructural development during rapid solidification [J]. Acta Metallurgica,1986,34(5):823-830.
- 作者简介:刘振民(1978.08—),男,河北邢台人,高级工程师,2022 年至今山西宏达钢铁有限公司担任总工程师,主要从事新品种材料研发管理工作。