

铸坯凝固过程及溶质元素偏析行为数值模拟研究

朱吴杰¹, 屈天鹏¹, 张志霄¹、王涵¹、李向龙¹, 王德永¹, 俞宏晔²

(1.苏州大学 钢铁学院 江苏 苏州 215000;

2.江苏嘉耐股份高温材料有限公司 中特嘉耐新材料研究院, 江苏 无锡 214200)

Numerical Simulation of Solidification Process and Solute Element Segregation Behavior of Casting Billet

ZHU Wu-jie¹, QU Tian-peng¹, ZHANG Zhi-xiao¹, WANG Han¹, Li Xiang-long¹, WANG De-yong¹, Chou Hong-ye²

(1.College of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou 21500, Jiangsu, China; 2.Citicsteel-Chianaref New Materials Research Institute, Chianaref Co., Wuxi 214200, China)

1. 前言

连铸业已成为钢铁生产的主要方式, 连铸生产最终目的是获得无缺陷铸坯^[1]。凝固过程中溶质元素的再分配会产生偏析会对钢的成品质量带来不利影响^[2]。末端电磁搅拌技术有助于减少中心偏析, 提高铸坯内部质量。但是末端电磁搅拌的安装位置过前会导致搅拌后偏析依旧存在; 安装位置过后会导致糊状区面积大, 钢水流动性差, 起不到应有的搅拌效果^[3]。但是频繁变动末端电磁搅拌位置, 会影响正常生产。所以, 在保证末端电磁搅拌位置不变的情况下, 可以通过调整连铸工艺参数来实现末端电磁搅拌的作用效果, 从而改善中心偏析。本文将结合射钉实验和连铸过程数值模拟研究。基于 TherCAST 模拟平台构建方坯连铸凝固过程的数学模型, 研究不同拉速和过热度对凝固末端的影响规律及凝固过程中的碳偏析行为。据此对现行连铸参数和末端电磁搅拌参数进行优化和修正, 提升电磁搅拌效率。

2. 实验方法

2.1 连铸坯的射钉实验

针对某厂 50 t 电弧炉生产线进行了铸坯质量研究, 工艺: 50 t 电炉→LF 炉精炼+VD 真空脱气处理→连铸。试验钢种采用 GCr15 轴承钢, GCr15 轴承钢的液相线 1455°C、固相线 1365°C, 其成分见表 1。方坯断面尺寸为 180 mm×220mm, 现有工艺条件为: 拉速 0.85m/min、中间包温度 1477°C, 结晶器水流量为 140m³/h, 足辊段 28L/min, 一段上 15L/min, 一段下 10.5L/min, 二段上 11.6L/min。为了测定方坯连铸过程的凝固坯壳厚度和凝固末端位置, 对方坯连铸过程进行了射钉试验。第一枪的位置据距弯月面 4.11m 处、第二枪距弯月面 8.72m 处, 末端电磁搅拌(F-EMS)的入口和出口与弯月面的距离分别为 10.7m 与 12.1m。

表 1 GCr15 钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of GCr15 steel

| 化学成分 (质量分数) /% | | | | | | | | | | | |
|----------------|-----|------|-------|-------|------|-------|-------|------|--------|--------|-----------------|
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Cu | Ti | Ca | Al _t |
| 0.97 | 0.2 | 0.31 | 0.017 | 0.008 | 1.46 | 0.024 | 0.006 | 0.03 | 0.0017 | 0.0002 | 0.015 |

2.2 仿真计算

应用“切片”法计算连铸机铸坯的凝固过程, 保持切片形状不变, 改变边界条件。从弯月面开始, 沿着拉坯方向运动, 利用模型计算凝固过程及元素偏析。本研究的钢种为 GCr15 轴承钢, 工艺条件为: 拉速

0.85-1.3m/min、过热度 25°C，成分如表 1 所示。液相线温度和固相线温度由 FactSage 平衡相图计算而得，液相线温度为 1455°C，固相线温度为 1433°C。连铸过程参数:导热系数、密度和热容这三种物性参数根据文献资料设置成温度的参数；热膨胀系数采用线性热膨胀 TLE 函数；凝固潜热设置为定值 245000J/kg-1。

3. 结果与分析

3.1. 180mm×220mm 方坯射钉试验结果

GCr15 轴承钢的射钉试验的射钉形貌如图 1 所示。从图 1 可以得到：①第一枪车削后的钉子形貌表明坯壳厚度为 56mm，中间液芯约为 68mm；②第二枪车削后的钉子形貌表明坯壳厚度为 100.5mm，中间液芯约为 19mm。

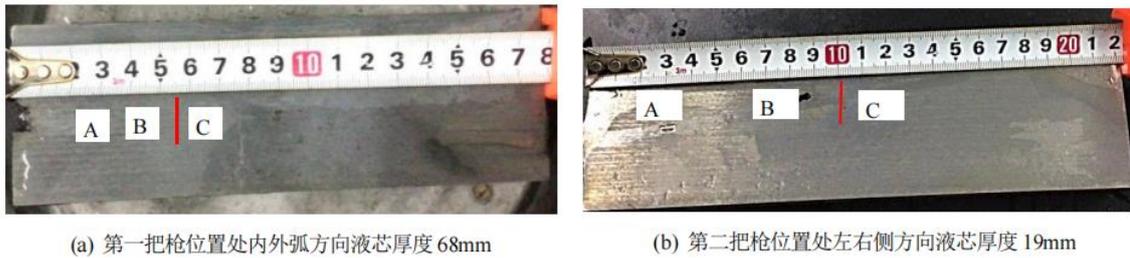


图 1 GCr15 钢射钉测试结果

Fig. 1 Nail test results for GCr15 steel

根据凝固过程的平方根定律对试验的凝固系数进行计算，回归出该连铸设备及工艺的凝固系数，平方根定律见式（1），射钉位置的纵向分布及射钉结果分析见表 2。根据表 2 中的凝固系数确认凝固终点平均值为 10.53m。而现场末端电磁搅拌入口距离弯月面 10.5m，出口距离弯月面 12m。该方坯在拉速为 0.85m/min 条件下，凝固终点位于电磁搅拌入口附近，此时铸坯基本凝固，不利于电磁搅拌。

$$\delta = k\sqrt{\tau} = k\sqrt{\frac{L}{V}} \quad (1)$$

式中： δ 为铸坯凝固坯壳厚度，mm； k 为凝固系数， $\text{mm}\cdot\text{min}^{-0.5}$ ； L 为铸坯上某点到弯月面距离，m； τ 为铸坯上某点到弯月面的所需时间，min； V 为拉速，m/min。

表 2 射钉位置的纵向分布及射钉结果分析

Table 2 Longitudinal distribution of nail position and analysis of nail result

| 断面尺寸 | 射钉位置 | 与弯月面距离 | 铸坯坯壳厚度 | 液芯厚度 | 凝固系数 | 预测终点 | 凝固终点平均值 |
|-------------|------|---------|----------|-------|--|----------|---------|
| 180mm×220mm | 第一枪 | 4100 mm | 56 mm | 68 mm | $25.47 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-0.5}$ | 10.616 m | 10.53 m |
| | 第二枪 | 8720 mm | 100.5 mm | 19 mm | $31.38 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-0.5}$ | 10.457 m | |

3.2. 仿真计算结果

探究不同拉速条件下铸坯坯壳厚度的变化规律，结果如图 2 所示。在原始拉速（0.85m/min）条件下，结晶器出口处的坯壳最厚；在 F-EMS 入口处，铸坯已经完全凝固，末端电磁搅拌作用效果微弱。随着拉速的提高，结晶器出口处的坯壳厚度逐渐减小；连铸过程中相同位置的坯壳厚度也随拉速的提高而减小。当拉速提高到 1.1m/min 后，在 F-EMS 区间内，铸坯液芯较厚，有利于末端电磁搅拌改善中心偏析。

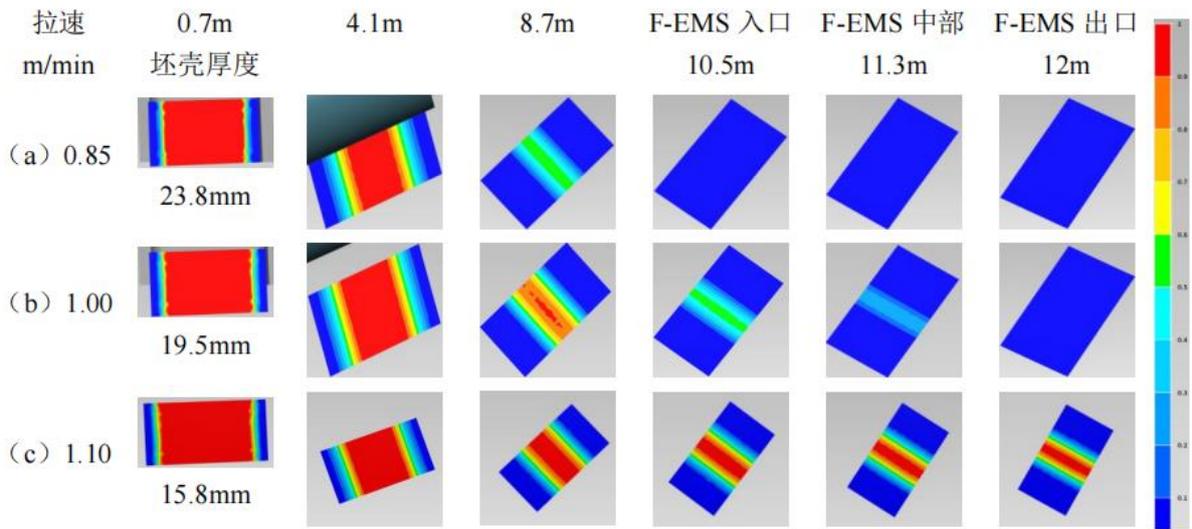


图 2.不同拉速下坯壳厚度的变化

Figure 2. Change of shell thickness under different casting speeds

探究不同拉速条件下温度及固相率的变化规律，结果如图 3 所示。随着拉速的提高，铸坯相同位置的温度逐渐升高。从固相率的变化图可以看出，当拉速为 0.85m/min 时，到达末端电磁搅拌位置之前，铸坯已经完全凝固。根据表 2 的射钉实验结果，结合本文 TherCAST 模拟实验结果，射钉实验计算的凝固终点为 10.53m，模拟结果的凝固终点为 10.2m，表明模拟实验结果和射钉实验具有良好的吻合关系。当拉速提高至 1m/min 时，凝固终点超过了末端电磁搅拌区域，末端电磁搅拌能够发挥其对末端富含溶质溶液的搅拌作用，以改善铸坯的中心偏析。

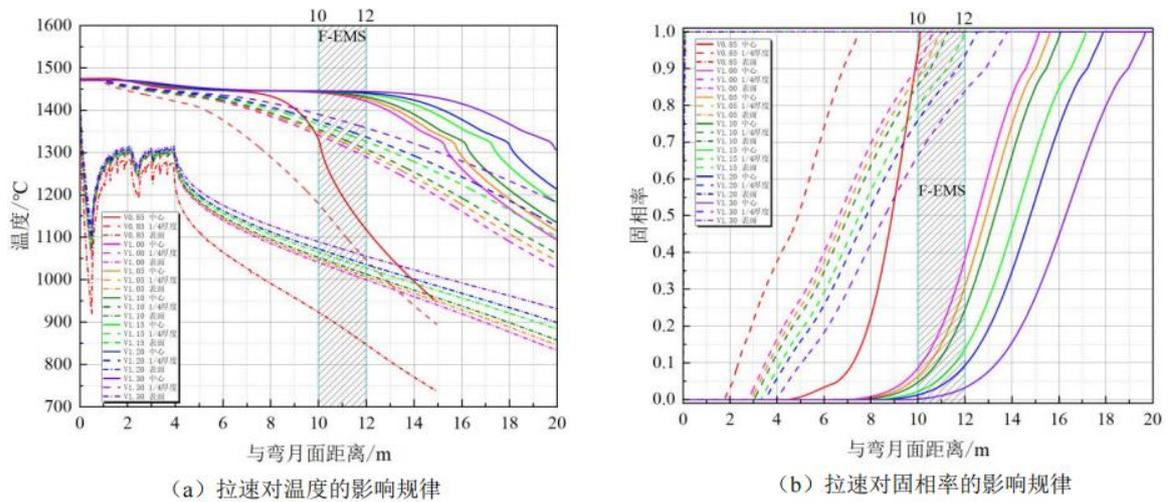


图 3.不同拉速下传热和凝固末端的变化

Figure 3. Change of heat transfer and solidification end at different casting speeds

探究不同拉速条件下溶质元素偏析的规律，结果如图 4 所示。与液相率图比较，发现碳浓度较高的位置和固液交界处的位置保持一致。铸坯在凝固过程中，由于选分结晶，溶质元素向液相区积聚，当柱状晶生长形成搭桥现象时，富集溶质元素的钢液被封闭，形成了 C、S 等溶质元素的偏析。

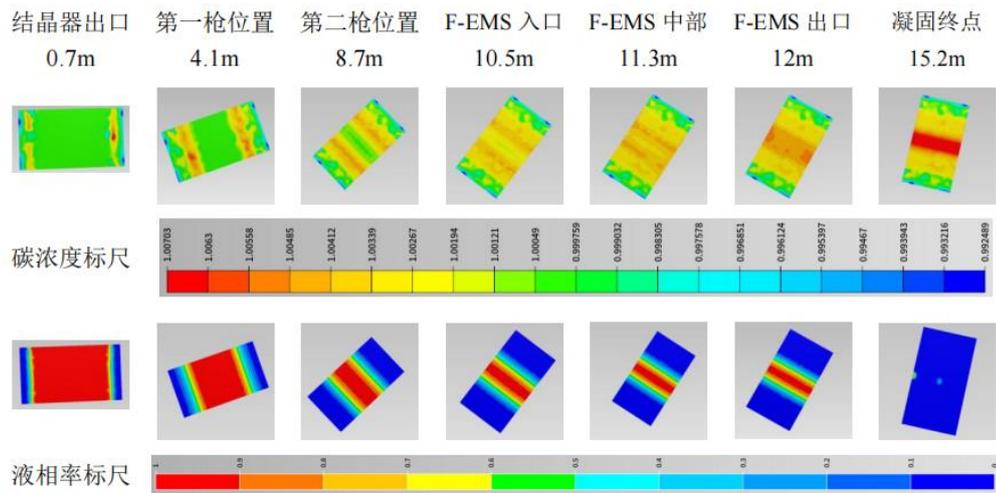


图 4. 1m/min 拉速下溶质元素偏析的规律

Figure 4. Law of solute element segregation at 1 m/min casting speed

3.3. 连铸工艺优化前后的低倍质量检测

根据射钉试验和 Thercast 仿真计算, 在评估工艺优化前的凝固末端位置基础上进行了工艺优化。通过提高拉速至 1m/min 来延长液芯的长度, 使凝固末端后移, 使末端电磁搅拌更充分地发挥作用。工艺优化前的铸锭低倍上存在芯部缩孔, 而工艺优化后的低倍上没有发现芯部缩孔。工艺优化后的铸坯低倍的一般疏松为 0 级, 中心疏松 ≤ 1.0 级, 中心偏析为 0 级的质量要求。

4. 结论

(1) 180mm \times 220mm 厚轴承钢方坯的射钉试验表明其凝固终点距离弯月面 10.53m, 在到达末端电磁搅拌位置前已经完全凝固, 末端电磁搅拌无法发挥作用。

(2) 结合射钉实验和本模型的数值模拟研究, 表明本模型能够较好的呈现铸坯的凝固过程及溶质元素偏析行为, 对实际工艺操作具有指导潜力。

(3) 根据射钉试验和模拟结果, 对连铸工艺参数进行了优化, 采用优化工艺后低倍质量表明: 中心疏松为 1 级、中心偏析为 0 级, 满足质量要求。

致谢

感谢国家自然科学基金项目 (52174321, 52074186) 和张家港市产学研基金项目 (ZKCXY2133) 对本论文研究工作的支持。

参考文献

- [1] 蔡开科, 程士富. 连续铸钢原理与工艺[M]. 冶金工业出版社, 1994.
- [2] Yin S K, Luo S, Zhang W J, et al. Numerical simulation of macrosegregation in continuously cast gear steel 20CrMnTi with final electromagnetic stirring[J]. 2021.
- [3] Poole G M, El-Kaddah N. An Improved Model for the Flow in an Electromagnetically Stirred Melt during Solidification[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2013, 44(6):1531-1540.