

基于数值模拟的钢坯表面负偏析带形成过程研究

霍云军¹, 李旭², 时涛²

¹ 宁波同人轴承有限公司 浙江宁波

² 大冶特殊钢有限公司 湖北黄石

【摘要】耦合电磁-流动-热-溶质传输,建立了多尺度、多物理场的三维数学模型,研究了高碳钢大方坯皮下负偏析带的形成过程,分析了负偏析形成的影响因素。

【关键词】连铸; 结晶器电磁搅拌; 铸坯; 负偏析带; 数值模拟

【收稿日期】2025 年 12 月 14 日

【出刊日期】2026 年 1 月 5 日

【DOI】10.12208/j.jer.20260003

Research on the formation process of negative segregation zone on the surface of steel billet based on numerical simulation

Yunjun Huo¹, Xu Li², Tao Shi²

¹Ningbo Tongren Bearings Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang

²Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi, Hubei

【Abstract】 Coupled with electromagnetic-flow-heat-solute transport, a three-dimensional mathematical model of multi-scale and multi-physical fields is established to study the formation process of negative segregation zone under the skin of high carbon steel ingot, and the influencing factors of the formation of negative segregation are analyzed.

【Keywords】 Continuous casting; Electromagnetic of crystallizer; Ingot; Negative segregation zone; Numerical simulation

1 引言

结晶器电磁搅拌是细化凝固组织、扩大等轴晶区、改善铸坯内部质量的有效技术手段之一^[1-4],然而伴随 M-EMS 而来的是皮下负偏析带 (white band)^[5-8]的形成。

关于负偏析带的形成机理目前还没有统一解释,工业上广泛认可的理论是溶质洗涤机理^[9,10],该机理认为,由于电磁力的作用使未凝固钢液发生流动,流动的液体冲洗凝固前沿,将凝固前沿富集溶质的钢液带走,形成负偏析带 (图 1)。

结晶器电磁搅拌对宏观偏析的作用受其安装位置、磁搅参数以及拉速和过热度的影响,由于连铸过程的高温与封闭性,采用工业实验或实验室实验往往很难直观清晰的观察白带的形成过程,这也是研究皮下负偏析带形成机理的一大阻力。近年来,已有不少研究^[7,8]采用数值模拟的方法来研究铸坯中宏观偏析行为,然而通过数值模拟分析铸坯皮下负偏析的形成过程及影响因素的研究还比较少。

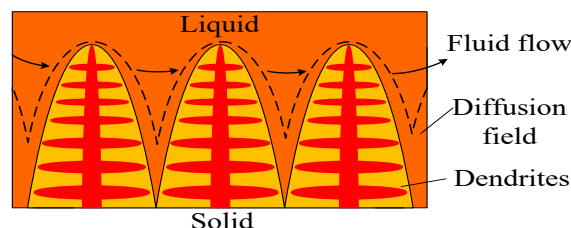


图 1 溶质洗涤机理示意图

2 实验方法

数值模拟 C 含量 0.82wt% 的 LX82A 高碳钢,模型计算域区间为 M-EMS 所影响的湍流区(从自由液面向下 1.5m),实验模拟了不同浸入式水口结构、磁搅参数、拉速以及过热度下大方坯宏观偏析结果。结晶器电磁搅拌中心距自由面 0.59m,磁场模拟采用 Maxwell 软件计算得出,然后将得到电磁力通过用户自定义函数 (UDF) 加入 Fluent 动量源项中。模型只考虑 C 元素的在铸坯中的偏析情况,模拟计算所需的参数及钢种热物性参数见表 1。

第一作者简介:霍云军(1967-)男,高中,中级工程师,浙江大学 MBA 结业,主要研究方向为钢铁冶金及材料失效分析。

表 1 模拟所需参数

| 参数名称 | 数值 |
|---|----------------------|
| 铸坯断面/mm ² | 300×390 |
| 结晶器有效长度/mm | 720 |
| 拉速/(m·min ⁻¹) | 0.6 |
| 密度/(kg·m ⁻³) | 6956 |
| 固液相导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | 25 (s) ; 33 (l) |
| 潜热/(J·kg ⁻¹) | 270000 |
| 比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) | 0.2043T+406.1 |
| 粘度/(Pa·s) | 0.1 (s) ; 0.0048 (l) |
| 初始 C 含量/wt% | 0.82 |
| 热膨胀系数/K ⁻¹ | 1.2×10 ⁻⁵ |
| 溶质膨胀系数 | 0.011 |
| 溶质 C 液相线斜率 | -8300 |
| 溶质 C 平衡分配系数 | 0.34 |
| 纯铁熔化温度/K | 1808 |

工业试验采用高斯计测量结晶器内磁感应强度, 对空载时搅拌器中心轴向的磁感应强度进行测量。偏析的检测采用钻孔取样实验, 从铸坯上钻孔, 钻孔位置

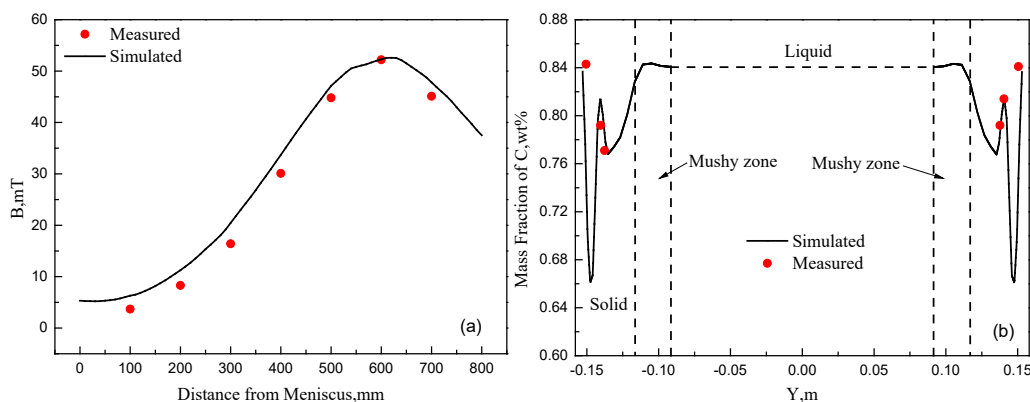


图 3 磁感应强度 (a) 和偏析结果 (b) 的验证

3.2 皮下负偏析的影响因素

3.2.1 结晶器电磁搅拌对负偏析的影响

图 4 (a)、(b) 为不同搅拌电流、频率下计算域出口 C 偏析结果, 可以看出电流或频率的改变对水口影响区的负偏析几乎没有影响, 而电流由 450A 增加到 750A 时, M-EMS 影响区的负偏析最小值分别为 0.779wt%、0.773wt%、0.768wt%; 磁搅频率由 2.0Hz 减小到 1.0Hz 时, M-EMS 影响区的负偏析最小值分别为 0.773wt%、0.768wt%、0.763wt%。图 5 (a) 为不同电

分别距内外弧表面 2.5mm、12.5mm 和 15mm, 使用碳硫仪对获得的钻屑进行 C 含量检测, 钻孔取样示意图见图 2。

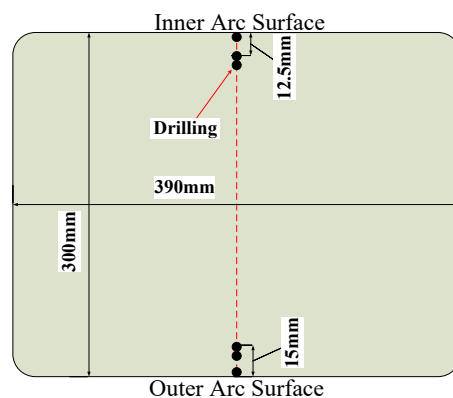


图 2 钻孔取样示意图

3 结果与讨论

3.1 模型验证

图 3 (a) 为结晶器中心轴向磁场模拟结果与现场测量结果对比, 图 3 (b) 为铸坯内外弧中心线方向 C 偏析模拟结果与实测结果对比, 整体上模拟结果与实测值基本吻合, 可以说明本模型的预测是准确可靠的。

流频率下结晶器电磁搅拌中心截面上钢液速度的变化, 可以看出, 凝固前沿钢液速度越大, M-EMS 影响区的负偏析程度越严重, 图 5 (b) 为一定凝固速率下, M-EMS 凝固前沿钢液流速与负偏析最小值的变化规律, 可以看出二者成线性关系。

3.2.2 过热度对负偏析的影响

图 4 (c) 为不同过热度下的偏析结果, 可以看出随过热度的增加, 铸坯表面处的 C 浓度逐渐减小, 过热度为 30℃时铸坯表面处直接为负偏析, 这是由于在

同一位置, 过热度越大, 钢液凝固速度越慢, 凝固前沿受水口射流冲击时间越长, 所以铸坯初始凝固时 C 浓度会下降。

3.2.3 拉速对负偏析的影响

图 4 (d) 为不同拉速下的偏析结果。可以看出随拉速增加, 铸坯表面 C 浓度逐渐降低, 这是由于拉速的增大会使钢液流速增大, 铸坯同一位置处凝固速度变慢导致的。

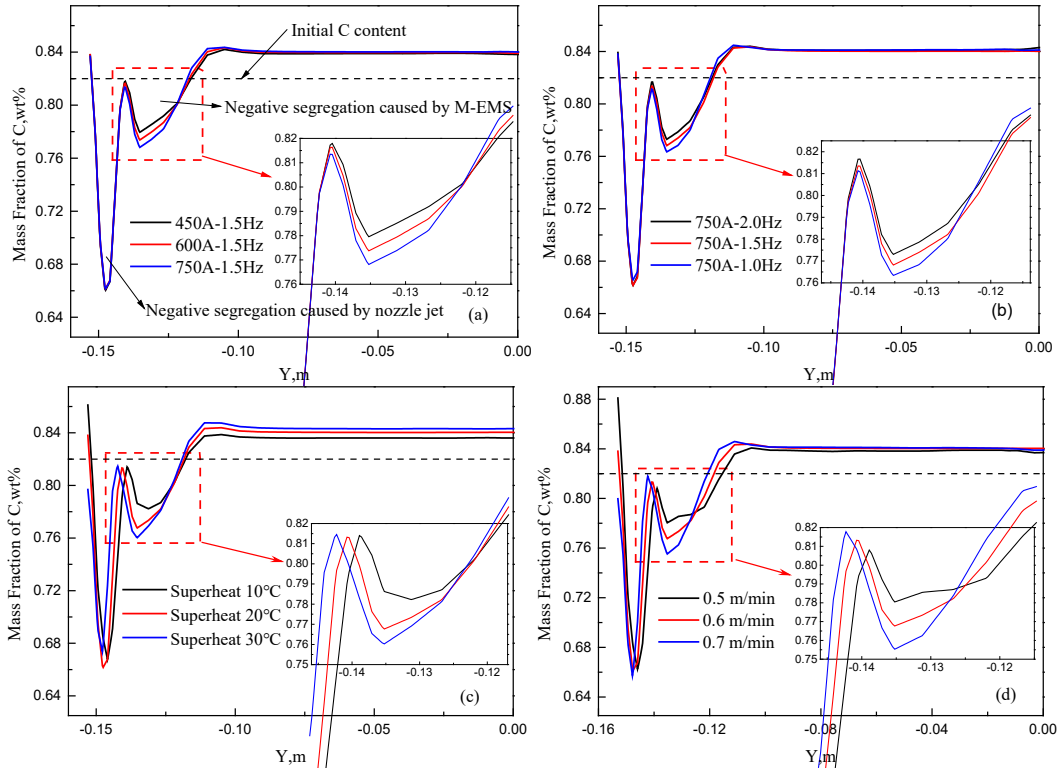


图 4 不同工艺条件下的偏析结果 (a b c d)

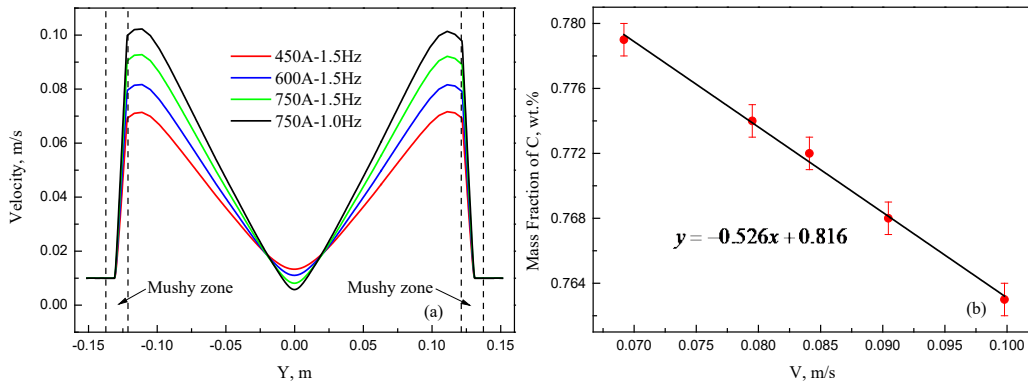


图 5 M-EMS 中心横截面的速度分布 (a) 以及流量与偏析规律 (b)

4 结论

通过建立电磁-流动-热-溶质传输三维耦合模型, 分析了大方坯皮下负偏析带的形成过程, 研究了不同水口、不同工艺参数对铸坯皮下负偏析的影响, 得出以下结论:

(1) 水口射流对凝固前沿的冲击也会使铸坯发生负偏析行为, 皮下负偏析带的形成是铸坯凝固前沿的

钢液流速和凝固速率共同作用的结果。

(2) 结晶器电磁搅拌参数对水口影响区的负偏析几乎没有影响, 磁电流越大, M-EMS 影响区的负偏析程度越严重; 磁搅频率越小, M-EMS 影响区的负偏析程度越严重。

(3) 过热度的增大会对水口影响区的负偏析产生轻微影响, 但会加剧 M-EMS 影响区的负偏析程度, M-

EMS 影响区的负偏析带有向铸坯表面偏移并扩大的趋势, 同时会使液相区内的 C 浓度增大。

(4) 拉速的增大会对水口影响区的负偏析产生轻微影响, 加剧 M-EMS 影响区的负偏析程度。

参考文献

- [1] WU H.Y., WEI N., BAO Y.P., et al. Effect of M-EMS on the solidification structure of a steel billet[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2011, 18 (2): 159-164.
- [2] AN H.H., BAO Y.P., WANG M., et al. Reducing macro segregation of high carbon steel in continuous casting bloom by final electromagnetic stirring and mechanical soft reduction integrated process[J]. Metallurgical Research & Technology, 2017, 114(4): 405.
- [3] Ayata K., Mori T., Fujimoto T., et al. Improvement of macrosegregation in continuously cast bloom and billet by electromagnetic stirring[J]. Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan, 2006, 24(11): 931-939.
- [4] AN H.H., BAO Y.P., WANG M., et al. Numerical and experimental investigation of solidification structure evolution and reduction of centre segregation in continuously cast GCr15 bloom[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2020, 47(9): 1063-1077.
- [5] 孙海波, 李烈军, 吴学兴, 等. 基于 M-EMS 工艺优化的齿轮钢偏析及淬透性带宽控制[J]. 钢铁, 2018, 53(08): 55-61.
- [6] 颜慧成. 结晶器电磁搅拌对齿轮钢端淬检验值的影响[J]. 金属材料与冶金工程, 2015, 43(5): 34-37.
- [7] SUN H., ZHANG J. Study on the macrosegregation behavior for the bloom continuous casting: model development and validation[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45(3): 1133-1149.
- [8] JIANG D.B., ZHU M.Y. Solidification structure and macrosegregation of billet continuous casting process with dual electromagnetic stirrings in mold and final stage of solidification: A numerical study[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47 (6): 3446-3458.
- [9] Sasaki K., Sugitani Y., Kobayashi S., et al. The effect of fluid flow on the formation of the negative segregation zone in steel ingots[J]. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, 1979, 65(1): 60-69.
- [10] Kor, W G.J. Influence of circumferential electromagnetic stirring on macrosegregation in steel[C]//Steelmaking Conference, 66 th. 1983: 133-142.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

