

连铸大圆坯喂钢带过程的三相凝固模拟研究

姚毓超, 刘中秋*, 齐凤升, 李宝宽

东北大学冶金学院, 沈阳 110819

Simulation Research on Feeding Strip Process Using a Three-phase

Solidification in Large Continuous Casting Round Bloom

Yao Yuchao, Liu Zhongqiu*, Qi Fengsheng, Li Baokuan

School of Metallurgy, Northeastern University, Shengyang, 110819, China

1. 前言

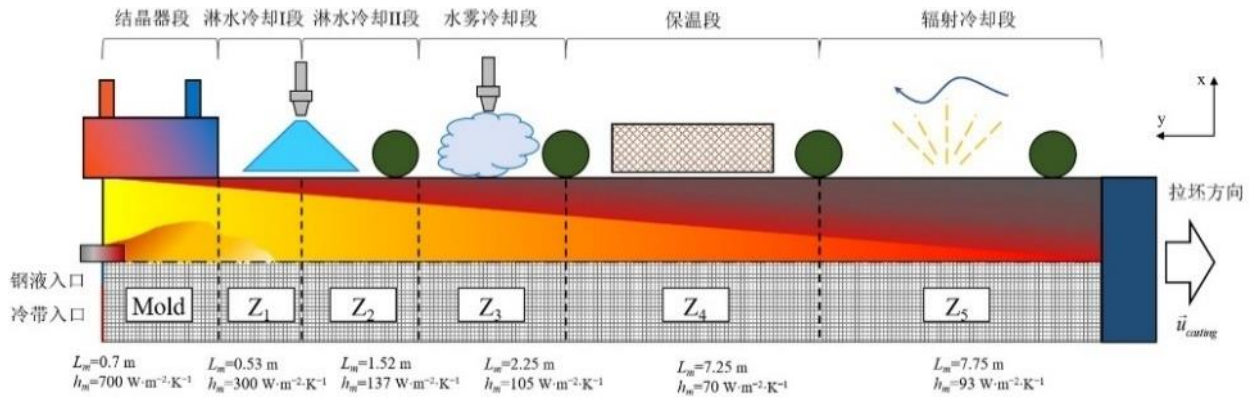
随着连铸坯截面的扩大, 单位长度铸坯热容量增大、散热面积减小, 连铸大圆坯表面的冷却强度难以渗透至圆坯内部, 造成芯部的热对流和溶质元素的再分配过程加剧, 进而导致连铸坯中心偏析、中心疏松、中心裂纹等内部质量缺陷日益突出, 已成为制约大截面连铸圆坯质量进一步提高的主要瓶颈^[1]。

针对不同钢种、尺寸和生产条件的连铸坯, 研究人员先后提出了改善钢液质量、低过热度浇注、电磁搅拌、轻压下和连铸结晶器喂钢带等方法用于提高铸坯质量。而喂钢带工艺的提出为改善大截面坯内部质量提供了新思路^[2]。Habu 等人^[3]首次报道了连铸结晶器喂钢带试验, 发现该工艺可有效抑制铸坯中心的宏观偏析。Isaev^[4]等人在亚速钢铁厂中发现, 喂带后铸坯的组织分布更加均匀, 而该工艺也已在亚速钢铁厂得到了应用。李维彪^[5]等人利用旅行薄片模型研究了喂带后铸坯内温度场的变化及分布特征。Niu^[6]设计了硫代硫酸钠可视化喂带实验装置, 研究了熔融液过热度、冷带厚度等参数对冷带相变过程的影响规律。Liu^[7]和 Niu^[8]等人利用 NH_4Cl -70% H_2O 搭建了类合金枝晶凝固实验系统, 并发展了基于体积平均法的柱状晶-等轴晶混合凝固-熔化模型, 较好地模拟了从完全液相到凝固的演变过程, 并验证了该模型的准确性。

为探究冷带与大截面高温铸坯之间的传输机理, 本文进一步发展了基于体积平均法的液相-柱状晶-等轴晶三相体积平均凝固模型, 探究钢带喂入量、钢带初温、钢带初始碳浓度等参数对连铸大圆坯凝固组织生长及宏观偏析的影响, 为连铸结晶器喂钢带工艺制度的制定奠定了理论基础。

2. 数学模型及计算条件

本文使用的液相-柱状晶-等轴晶三相体积平均凝固模型, 包括质量、动量、能量及溶质守恒的宏观模型和连续形核、等轴晶及柱状晶生长的微观模型, 控制方程及模型细节可见文献^[9]。研究对象是立式大圆坯连铸机, 主要包括 6 个冷却区域: 结晶器段、淋水冷却I段、淋水冷却II段、水雾冷却段、保温段和辐射冷却段, 物理模型及边界条件如图 1 所示。热物性参数及模型验证可见文献^[9]。

图 1 物理模型及边界条件^[9]Fig. 1 Physical model and boundary conditions^[9]

3. 结果与分析

3.1. 喂带对多物理场的影响

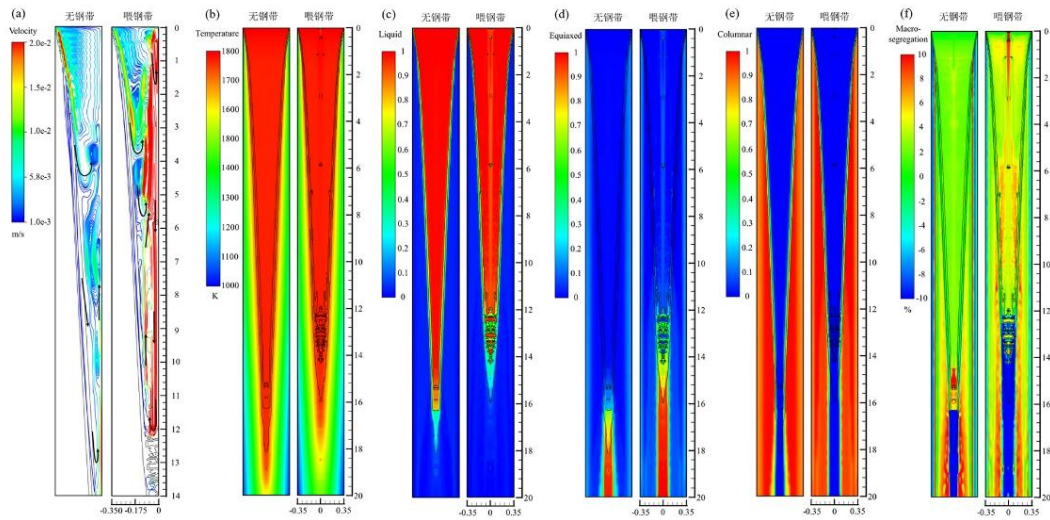
图 2 为有/无钢带时连铸大圆坯的多物理场。喂带后，铸坯中心产生了向下的热浮升力和晶粒对液相向下的曳力，在两种的力的叠加作用下，铸坯液芯形成了向下的高速流股，该流股冲击糊状区后沿柱状晶尖端向上流动，如图 2(a) 所示。由图 2(b)和(c) 可以看出，喂带后连铸大圆坯液芯内大量热量被吸收，因此高温区（红色区域）和液芯的长度明显缩短。该现象也意味着，喂带有利于提高拉速，进而提高生产效率。图 2(d)和(e) 为有/无钢带时等轴晶和柱状晶相的分布情况。喂带促进了等轴晶的形核和生长，因此在钢带下方形成了“结晶雨”，等轴晶粒沉积至铸坯中心，促进了柱状晶向等轴晶转变（Columnar to equiaxed transition, CET）的发生，提高了完全凝固位置的等轴晶率，该现象将有利于提高铸坯的致密度。

图 2(f) 为有/无钢带时宏观偏析指数的分布情况，偏析指数计算公式如（1）和（2）所示。喂带前，等轴晶凝固和沉降过程中不断析出高浓度溶质（碳），导致其在液相中富集。在液芯末端，等轴晶逐渐沉积和聚集并析出大量溶质，呈现出强烈的正偏析。喂带后，钢带下方等轴晶的快速形核和生长，导致大量溶质被析出，呈现正偏析。由于喂带后在液芯末端产生的顺时针流股有利于将糊状区中的高浓度溶质携带到液芯中，因此液芯底部糊状区的宏观偏析指数相对喂带前较低，而液芯大部分区域的宏观偏析指数相对较高。但该流股也使液芯末端糊状区的溶质分布更加均匀，因此喂带后完全凝固位置的偏析指数分布得到了改善。

$$c_{mix} = \frac{c_l \cdot \rho_l \cdot f_l + c_e \cdot \rho_e \cdot f_e + c_c \cdot \rho_c \cdot f_c}{\rho_l \cdot f_l + \rho_e \cdot f_e + \rho_c \cdot f_c} \quad (1)$$

$$\Gamma = 100 \times \frac{c_{mix} - c_0}{c_0} \quad (2)$$

式中， c_{mix} 为混合溶质质量分数； c_l 、 c_e 、 c_c 分别为液相、等轴晶相和柱状晶相的溶质质量分数； ρ_l 、 ρ_e 、 ρ_c 分别为液相、等轴晶相和柱状晶相的密度； f_l 、 f_e 、 f_c 分别为液相、等轴晶相和柱状晶相的体积分数； Γ 为宏观偏析指数； c_0 为浇注钢液的初始溶质浓度。

图 2 有/无钢带的多物理场及液相率等值线 ($f=0.1, 0.5$ 和 0.9) [9]

(a) 流场; (b) 温度场; (c) 液相分布; (d) 等轴晶相分布; (e) 柱状晶相分布; (f) 偏析指数分布

Fig. 2 Multi-physics field and isolines ($f=0.1, 0.5$ and 0.9) with/without strip[9]

3.2. 喂带量的影响

为探究喂带量对连铸大圆坯凝固组织及宏观偏析分布的影响规律，分别设立了 0.5 %、1.0 % 和 2.0 % 三组喂带比（喂带量/浇注量），并加入一组不喂带的工况作为对比组。四种工况下完全凝固位置（距弯月面 20 m）断面的等轴晶相及偏析指数分布如图 3 所示。以 CET 发生位置 ($f_c=0.49$) 作为比较点。不喂钢带、0.5 % 喂带比、1.0 % 喂带比、2.0 % 喂带比时，CET 点分别占半径的 23.23 %、22.22 %、27.27 % 和 34.34 %。不喂带时，宏观偏析指数最大值为 24.70 %，最小值为 -51.32 %，宏观偏析指数极值之差为 76.02 %。喂带后，0.5 %、1.0 % 和 2.0 % 三组喂带比的断面最大和最小宏观偏析指数的极值差分别减小到 44.93 %、38.36 % 和 46.60 %。与不喂带相比，1.0 % 喂带比的宏观偏析指数极值之间的差值减小了 38.36 %，在研究范围内宏观偏析的改善效果最佳，详细内容可见文献[9]。

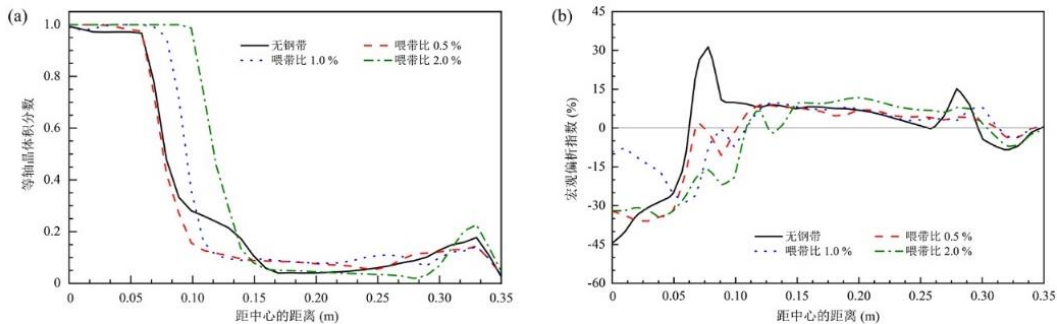


图 3 不同喂带量条件下距弯月面 20 m 断面处的凝固组织及宏观偏析分布[9]

(a) 等轴晶相分布; (b) 宏观偏析指数分布

Fig. 3 Solidification structure and macrosegregation index at 20 m below the meniscus under different feeding ratios[9]

3.3. 钢带初温的影响

图 4(a) 为不同钢带初温条件下弯月面下 20 m 断面处等轴晶体积积分数的分布。随着钢带初温的改变，从 CET 点到中心的距离（不喂带，钢带初温为 700 K、500 K 和 300 K）分别为断面半径的 23.23 %、24.29 %、27.27 % 和 29.43 %，即随着喂带初温的降低，等轴晶相体积分数逐渐增加。图 4(b) 为不同钢带初温条件下宏观偏析指数的分布。由图可知，距中心 0-0.1 m 处主要表现为负偏析，而 0.1-0.35 m 处主要表现为正偏

析。随着钢带初温的降低,正负偏析过渡点逐渐接靠近铸坯的表面,这与图 4(a) 中 CET 点的移动相对应。在不喂带,钢带初温为 700 K, 500 K 和 300 K 的条件下,偏析指数的极值差分别达到 75.86%, 50.09%, 38.36%和 41.66%。因此,钢带初温为 500 K 时,铸坯溶质分布更均匀,对大圆坯的改善效果更显著。

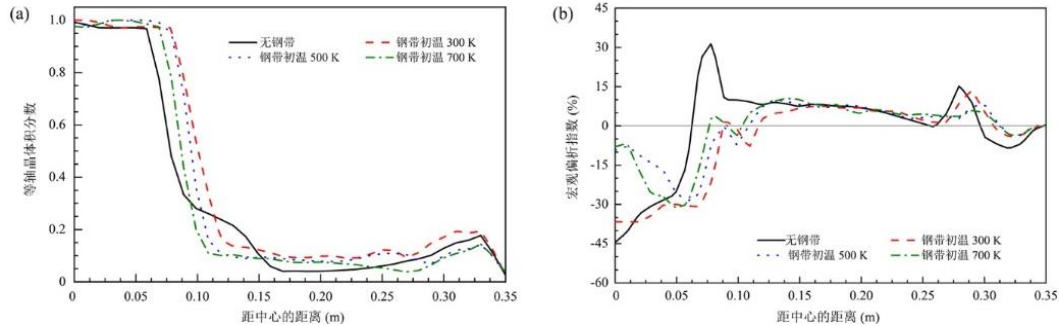


图 4 不同钢带初温条件下距弯月面 20 m 断面处的凝固组织及宏观偏析分布

(a) 等轴晶相分布; (b) 宏观偏析指数分布

Fig. 4 Solidification structure and macrosegregation index at 20 m below the meniscus under different feeding initial temperatures

3.4. 钢带碳浓度的影响

选取浇注钢液的碳浓度作为基准碳浓度,分别选取不喂带和钢带碳浓度为钢液碳浓度(0.432%)0.5倍、1.0倍、1.5倍的四种工况,距弯月面 20 m 断面处的凝固组织及宏观偏析分布如图 5 所示。由图 5(a)可知,在平均碳浓度较低的氛围中,柱状晶的生长处于更优势的地位,因此喂入 0.5 倍钢液碳浓度的钢带时,CET 点距中心的距离仅为半径长度的 19.19%,甚至低于不喂带时 23.23%的占比。喂入 1.0 倍钢液碳浓度的钢带时,等轴晶占比分别为半径的 27.27%。但喂入钢带碳浓度过高时(钢带碳浓度为钢液碳浓度的 1.5 倍),糊状区和“结晶雨”中等轴晶更多的处于高碳浓度的环境中,等轴晶占比率低于 1.0 倍钢液碳浓度的钢带,其值为 25.25%。从图 5(b) 可以看出,喂带后在液芯中下部产生的顺时针流使得溶质在铸坯径向的分布更加均匀,铸坯的宏观偏析得到显著改善。不喂带与喂入 0.5 倍、1.0 倍、1.5 倍钢液碳浓度的钢带时,断面最大和最小宏观偏析指数的极值差分别为 76.02%, 50.69%、38.36%和 41.32%,因此在研究范围内,喂入 1.0 倍钢液碳浓度的钢带时极值差最小,对宏观偏析的改善效果最好。

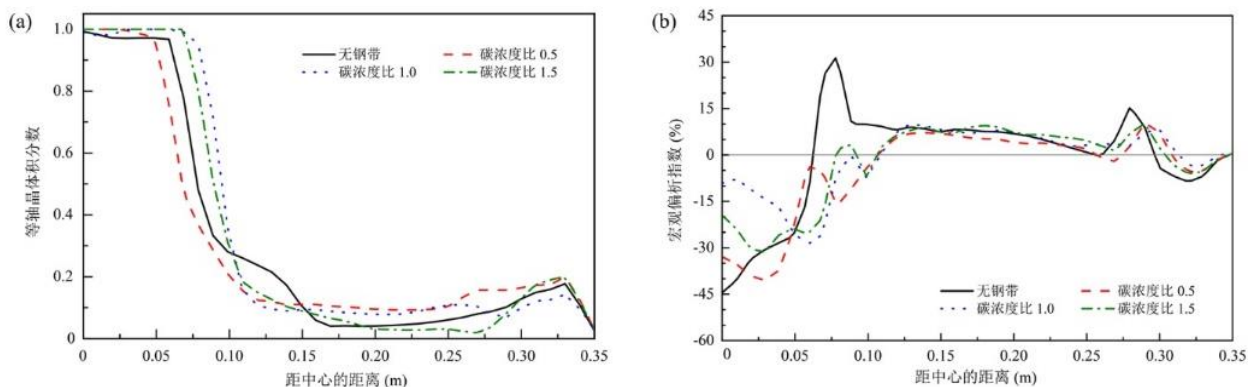


图 5 不同钢带碳浓度条件下距弯月面 20 m 断面处的凝固组织及宏观偏析分布

(a) 等轴晶相分布; (b) 宏观偏析指数分布

Fig. 5 Solidification structure and macrosegregation index at 20 m below the meniscus under different feeding carbon concentrations

4. 结论

（1）冷钢带通过自身升温 and 相变，在结晶器内吸收了大量热量，促进了该位置附近等轴晶的形核，产生了“结晶雨”现象。同时由于喂带产生的高速向下流和折返流，促进了溶质的均匀分布和 CET 的发生，有利于削弱宏观偏析和提高等轴晶相的径向体积占比。

（2）钢带喂入量、钢带初温、钢带初始碳浓度等参数均会对凝固组织和宏观偏析分布产生较大影响。在研究范围内，当喂入量（比）为钢液浇注量的 1.0%，钢带初温为 500 K，钢带碳浓度与钢液碳浓度相同（1 倍）时，断面宏观偏析指数极值差为 38.36%，等轴晶相的体积占比为断面半径的 27.27%，对连铸大圆坯的改善效果最佳。

致谢

感谢国家自然科学基金项目（项目号：51974071），重大工程材料服役安全研究评价设施国家重大科技基础设施开放课题基金（项目号：MSAF-2021-009）和中央高校基础研究基金（项目号：N2225011）的支持。

参考文献

- [1] 刘中秋, 李宝宽, 肖丽俊, 干勇. 连铸结晶器内高温熔体多相流模型化研究进展[J]. 金属学报. 2022, 58(10): 1236-1252.
- [2] 刘中秋, 牛冉, 李宝宽. 连铸喂钢带工艺中冷钢带熔化规律的研究[C]. 中国湖北武汉: 20172.
- [3] Habu Y, Itoyama S, Emi T, et al. Improving Continuously Cast Structure and Centerline Cast Slabs by Adding Steel Segregation Strip of into Mold[J]. Tetsu- to- Hagane. 1981, 67(9): 1498-1507.
- [4] Isaev O B. Effectiveness of Using Large Cooling Elements to Alleviate Axial Segregation in Continuous-Cast Ingots[J]. Metallurgist (New York). 2005, 49(7): 324-331.
- [5] 李维彪, 王芳, 齐凤升, 等. 结晶器喂钢带连铸坯凝固过程的数学模拟[J]. 金属学报. 2007(11): 1191-1194.
- [6] Niu R, Li B K, Liu Z Q, et al. Melting of Moving Strip during Steel Strip Feeding in Continuous Casting Process[J]. steel research international. 2018, 89(5): 1700407.
- [7] Liu Z Q, Niu R, Wu Y D, et al. Physical and numerical simulation of mixed columnar-equiaxed solidification during cold strip feeding in continuous casting[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021, 173: 121237.
- [8] Niu R, Li B, Liu Z, et al. Experimental Investigation of Solidification in the Cast Mold with a Consumable Cooler Introduced Inside[J]. Metals. 2019, 9(1): 55.
- [9] Yao Y C, Liu Z Q, Li B K, et al. Effect of steel strip feeding on the columnar-equiaxed solidification in a large continuous casting round bloom[J]. Journal of Materials Research and Technology. 2022, 20: 1770-1785.