

· 冶炼与凝固 ·

## 薄板坯结晶器内中锰钢流动与凝固行为数值模拟



田润雨<sup>1</sup>, 宋秉钧<sup>2</sup>, 彭中源<sup>1</sup>, 邱雅蓉<sup>1</sup>, 孔令种<sup>1</sup>, 杨杰<sup>1</sup>

(1 辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051; 2 鞍山钢铁股份有限公司炼钢总厂, 鞍山 110023)

**摘要:**采用数值模拟方法对断面尺寸为 1 500 mm×90 mm 的中锰钢薄板坯连铸结晶器内钢液流动与凝固特征进行了研究, 分析了反应性保护渣的熔化与混合行为。研究表明, 在拉速为 5 m/min、浸入深度为 300 mm 的案例下, 中锰钢在结晶器中下部约宽面四分之一附近的温度波动较大, 因坯壳传热慢导致在结晶器出口处窄面的坯壳较薄, 厚度仅为 7.73 mm。对比低碳钢渣圈形状发现, 中锰钢连铸过程中形成的渣圈尺寸略小, 并以初始层成分为主, 固态渣膜经不同阶段的反应层与初始层混合形成, 结晶器上部因保护渣成分变化易导致坯壳初始凝固不均匀。

**关键词:**中锰钢; 薄板坯; 结晶器; 保护渣

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.2024-00123 **中图分类号:**TF777.7

## Numerical Simulation of Flow and Solidification Behavior of Medium Mn steel in Thin Slab Mold

Tian Runyu<sup>1</sup>, Song Bingjun<sup>2</sup>, Peng Zhongyuan<sup>1</sup>, Qiu Yarong<sup>1</sup>, Kong Lingzhong<sup>1</sup>, Yang Jie<sup>1</sup>

(1 School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan114051, China;  
2 General Steelmaking Plant, Angang Steel Company Limited, Anshan110023, China)

**Abstract:** The flow and solidification characteristics of molten steel in thin slab continuous casting mold of medium Mn steel with section of 1 500 mm×90 mm were studied by numerical simulation. The melting and mixing behavior of reactive mold slag was analyzed. The results showed that in case of casting speed of 5 m/min and immersion depth of 300 mm, the temperature of the medium Mn steel fluctuated greatly around about a quarter of the width surface of the lower layer. Due to the slow heat transfer of the shell, the solidified shell of narrow face at the mold outlet was thin and its thickness was only 7.73 mm. The slag rim formed in the continuous casting process of medium Mn steel was slightly smaller in size and mainly consisted of the initial slag layer. The solid slag film was formed by mixing the initial layer and the reaction layer at different stages. The initial solidification of the shell was easy to be uneven due to the change of the slag ingredient in the upper part of the mold.

**Key Words:** Medium Mn steel; Thin Slab; Mold; Mold Slag

钢铁材料在汽车工业中一直占据着主导地位, 在当前节能、安全、环保的汽车技术发展主题的推动下, 汽车用钢向着兼具轻量化与安全性的方向发展。其中, 高强塑性中锰钢作为第 3 代先进汽车用钢, 因其具有高强度、高塑性和高应变硬化能力, 且能满足节能、低成本的要求而展现出广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。传统热轧工艺需将钢坯经加热炉加热再进行轧制, 中锰钢铸坯经过先冷却、再加热的过程极易产生表面纵裂纹, 这成为了制约中锰钢稳定生产的重要因素。采用薄板坯连铸连轧工艺直接生产薄规格中锰钢, 不仅可以避免因温度大幅变化造成的铸坯裂纹问题, 还可以极大地简化生产工艺流程、降低生产成本和能耗、减少污染物排放<sup>[4-5]</sup>, 而目

前尚未有相关研究工作开展。

薄板坯连铸生产过程具有拉速高、钢液凝固快、热流密度大以及坯壳在结晶器内变形等特点, 因此, 薄板坯连铸存在着铸坯表面质量不高的问题, 表面纵裂缺陷较为普遍<sup>[6-8]</sup>。此外, 由于中锰钢的线膨胀系数较大, 并且其导热性显著低于普通钢种<sup>[9-10]</sup>, 受此特性影响, 结晶器内中锰钢凝固坯壳的内外温度梯度较大, 坯壳凝固收缩后与铜板之间形成不均匀的气隙, 坯壳局部的反复回温极易引发裂纹, 甚至导致漏钢事故。此外, 中锰钢中含有较高含量的 Mn、Al 等还原性较强的合金元素, 与保护渣中 SiO<sub>2</sub> 等成分反应后, 致使保护渣物化性质发生显著变化, 从而导致渣道条件恶化<sup>[11-15]</sup>。因此, 在中锰

基金项目: 辽宁省教育厅面上项目(LJKMZ20220647)

作者简介: 田润雨(2005—), 女, 本科; E-mail: 3119252534@qq.com; 收稿日期: 2024-05-06

通信作者: 杨杰(1987—), 男, 博士, 副教授; E-mail: jierui1120@163.com

钢薄板坯连铸工艺中仍存在诸多技术难点。

国内外众多学者对薄板坯连铸结晶器内钢液流动与凝固传热现象已进行了大量研究,但研究所使用的钢种大都为常规钢种,对于中锰钢在薄板坯结晶器内钢液流动与凝固传热行为以及保护渣流动与混合行为等缺乏认识。本文通过数学模拟方法对中锰钢薄板坯结晶器内多相流动、传热与凝固特征以及反应性保护渣混合行为进行研究。

## 1 数学模型

### 1.1 控制方程

采用流体体积函数模型(VOF)通过追踪不同流体体积分数来描述钢-渣界面,其连续性方程和动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_{\text{steel}}\rho_{\text{steel}}) + \nabla \cdot (\alpha_{\text{steel}}\rho_{\text{steel}}\vec{v}) = S_{\alpha_{\text{steel}}} + \sum(\dot{m}_{\text{slag}-\text{steel}} - \dot{m}_{\text{steel}-\text{slag}}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\text{mix}}\vec{v}) + \nabla \cdot (\rho_{\text{mix}}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[ \mu_{\text{mix}} \left( \nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) \right] + \rho_{\text{mix}}\vec{g} + \vec{F}_{\sigma} - S_m \quad (2)$$

$$\rho_{\text{mix}} = \alpha_{\text{steel}}\rho_{\text{steel}} + (1 - \alpha_{\text{slag}})\rho_{\text{slag}} \quad (3)$$

$$\mu_{\text{mix}} = \alpha_{\text{steel}}\mu_{\text{steel}} + (1 - \alpha_{\text{slag}})\mu_{\text{slag}} \quad (4)$$

式中, $\alpha$ 为相体积分数; $\rho$ 为密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $\vec{v}$ 为速度矢量; $\dot{m}$ 为相间质量传输; $\mu$ 为黏度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ; $p$ 为压力, $\text{N}/\text{m}^2$ ; $\vec{g}$ 为重力加速度, $\text{m}/\text{s}^2$ 。

根据相体积分数对能量方程进行求解:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\text{mix}}E_{\text{mix}}) + \nabla \cdot \left[ \vec{v}(\rho_{\text{mix}}E_{\text{mix}} + p) \right] = \nabla \cdot (K_{\text{eff}}\nabla T) \quad (5)$$

式中, $E_{\text{mix}}$ 为混合焓, $\text{J}$ ; $K_{\text{eff}}$ 为综合传热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

基于可实现的k- $\varepsilon$ 模型计算结晶器内多相流动行为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\text{mix}}k) + \nabla \cdot (\rho_{\text{mix}}k\vec{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu_{\text{mix}} + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho_{\text{mix}}\varepsilon + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\text{mix}}\varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_{\text{mix}}\varepsilon\vec{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu_{\text{mix}} + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho_{\text{mix}}C_1S_\varepsilon - \rho_{\text{mix}}C_2\frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + S_\varepsilon \quad (7)$$

式中, $k$ 为湍流脉动动能, $\text{m}^2/\text{s}^2$ ; $\varepsilon$ 为湍流脉动动能耗

散率, $\text{m}^2/\text{s}^3$ ; $G_k$ 为由层流速度梯度而产生的湍动能, $\text{m}^2/\text{s}^2$ ; $\mu_t$ 为涡旋黏度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。

### 1.2 模型参数与边界条件

基于薄板坯结晶器实际工况建立四分之一三维几何模型,浸入式水口采用牛鼻子水口,结晶器有效长度为1 100 mm,为了保证钢液流动能充分发展,将钢液计算域延长至2 200 mm,结晶器内部钢液初始液面距顶部100 mm,在初始液面上方有30 mm的保护渣层,包括25 mm厚初始层和5 mm厚反应层,渣层上方为70 mm空气层用来模拟空气的影响,为了得到准确的钢渣液面波动情况,对各相交界面的网格进行细化处理,如图1所示。模型计算参数见表1。

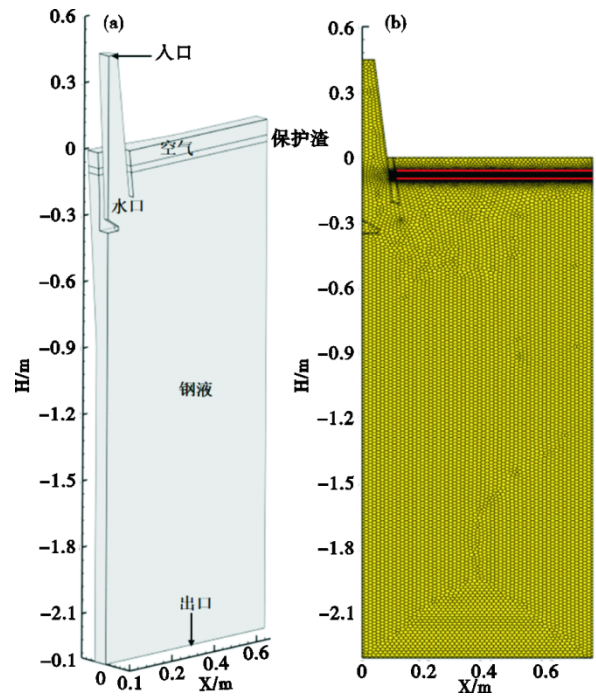


图1 结晶器模型:(a)几何尺寸,(b)网格划分

Fig. 1 Mold model: (a) geometric size, (b) grid division

表1 模型计算参数

Table 1 Model calculation parameters

参数	数值
结晶器出口宽度/mm	1 500
结晶器出口厚度/mm	90
水口浸入深度/mm	300
水口角度/(°)	20
拉速/( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ )	5
过热度/°C	15

以锰质量分数为5%的中锰钢为研究对象,同

时选取 C 质量分数为 0.03% 的低碳钢作为对比分析,其化学成分和物性参数分别见表 2 和表 3<sup>[10,16]</sup>。基于实际测量的导热系数随温度变化曲线如图 2 所示。

表 2 试验钢的化学成分(质量分数)  
Table 2 Chemical composition of test steel %

钢种	C	P	S	Si	Al	Mn
中锰钢	0.04	0.005	0.003	0.30	0.03	5.00
低碳钢	0.03	0.011	0.007	0.02	0.02	0.23

表 3 试验钢的物性参数

Table 3 Physical properties parameters of test steel

钢类	液相线温度/°C	固相线温度/°C	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	凝固潜热/(J·kg <sup>-1</sup> )	黏度/(Pa·s)
中锰钢	1 470	1 435	7 020	272 000	0.006 5
低碳钢	1 495	1 475	7 120	242 000	0.006 5

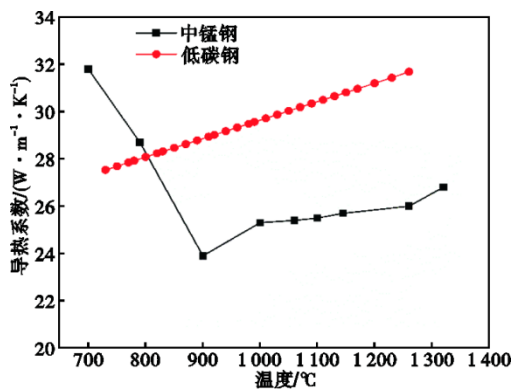


图 2 试验钢的导热系数  
Fig. 2 Thermal conductivity of test steel

考虑中锰钢连铸过程钢液与保护渣的反应问题,模型将保护渣层按照初始层和反应层分别进行定义,其性质见表 4<sup>[17]</sup>。

## 2 结晶器内中锰钢凝固传热行为

### 2.1 结晶器内中锰钢温度分布特征

结晶器内宽面中心温度场和速度场分布如图 3 所示。高温钢液沿水口的出口角度以近似直线的方向流向结晶器窄面,钢液在该方向运动的同时不断向其他方向扩张,并且流速逐渐降低。当钢液流

股冲击到结晶器窄面后则分成向下和向上两个流股,其中,向下的流股沿结晶器窄面下行,当流动动能逐渐减弱使流股达到一定冲击深度后则向中心流动,进而在结晶器内形成一个较大的回流区;而向上的流股则沿结晶器窄面向上流动到达钢渣界面,从而对钢渣界面进行扰动,同时也进行向上的传热为保护渣熔化提供热量,因此,结晶器内钢液的上回流对于液位波动、保护渣流动与熔化均产生了重要影响,但这种影响在不同钢种之间的区别并不大。

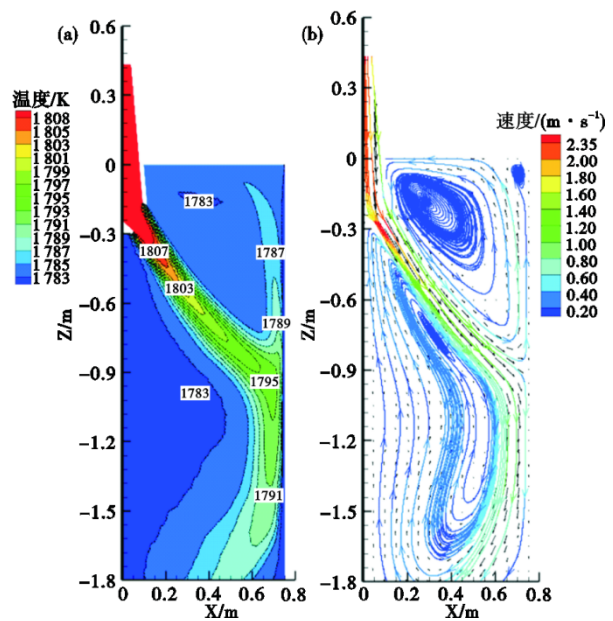


图 3 中锰钢结晶器内宽面中心温度场和速度场分布图:(a) 温度场,(b)速度场

Fig. 3 Distribution of temperature field and velocity field in the wide-surface center of the mold of medium manganese steel: (a) temperature field, (b) velocity field

中锰钢结晶器内不同横截面上的温度分布如图 4 所示。可以看到,在距离弯月面 0.1、0.3 m 的截面上温度较为均匀,而沿结晶器高度向下的横向温度分布逐渐出现波动,在结晶器出口处的温度波动最为显著。结晶器内温度分布与高温钢液的流动路径有关,钢液冲击到窄面后主要产生沿窄面向下的流动和沿宽面的反向流动,其中,在宽面方向形

表 4 保护渣物性参数

Table 4 Physical properties parameters of mold slag

项目	凝固温度/°C	1 300 °C时黏度/(Pa·s)	结晶潜热/(J·kg <sup>-1</sup> )	钢渣界面张力/(N·m <sup>-1</sup> )
初始层	1 117	0.391	658 000	1.33
反应层	1 084	0.191	691 000	1.40

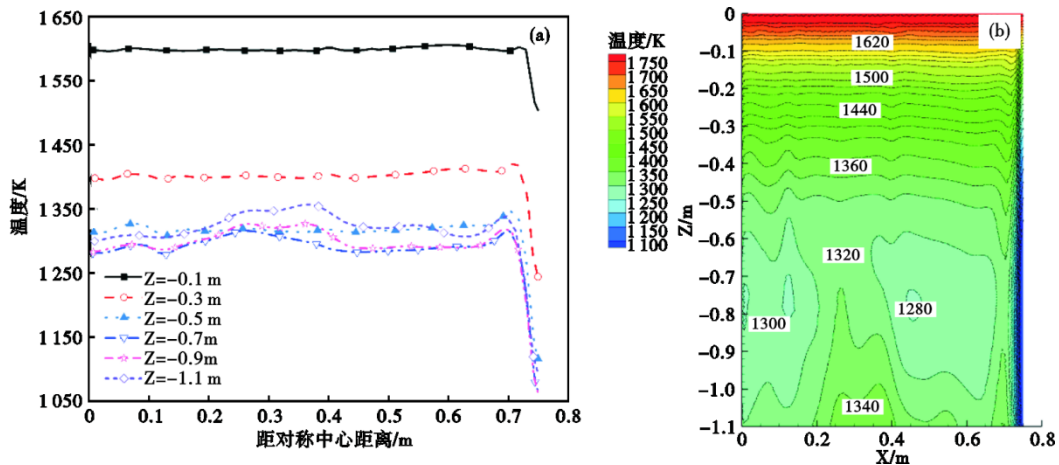


图 4 结晶器内不同横截面上的温度分布: (a)宽面表面温度, (b)温度云图

Fig. 4 Temperature distribution on different cross sections in the mold: (a) surface temperature on wide face, (b) temperature cloud map

成的回流约在宽面四分之一附近集中向上流动,由此造成了该区域的温度升高。受中锰钢导热性较差的影响,无论是在水平方向上,还是在结晶器高度方向上,其在结晶器内的温度梯度都更大,并在上述典型温度波动区域的波动幅度也更大。

2.2 保护渣熔化与流动

覆盖在钢液表面的粉渣吸收钢水热量后熔化形成液态保护渣熔池,液态保护渣流入到结晶器与铸坯之间形成渣膜起到润滑凝固坯的作用。作为液态保护渣的供给容器,熔渣池的深度取决于保护渣的熔化性质和消耗速率。对于中锰钢连铸而言,与钢液接触的反应层熔化温度更低,从而使得熔渣池的液位线比浇注常规钢种时更高。在弯月面附近,固态保护渣经过持续长大,逐渐形成厚度较大的渣膜,也就是渣圈。渣圈会随着结晶器振动,对液态保护渣的持续流入和铸坯凝固都会产生重大影响。为了验证模型的准确性,如图 5 所示,对比了模型计算与生产实际的保护渣圈形状。相比于浇注常规钢种形成的渣圈,中锰钢连铸过程中形成的渣圈尺寸略小,下方也更薄,保护渣黏度降低使其在不断凝固“涂抹”渣圈轮廓的过程中积累的量更少,因此,最终形成的渣膜尺寸也更小。由此可知,中锰钢连铸过程中,保护渣圈对于液态保护渣的流入以及铸坯凝固过程的影响是较小的。由于实际工况更加复杂,并且渣圈表面粘有部分粉渣,因此,其轮廓相较于模拟结果更加具有不规则性,但二者整体尺寸相近,验证了模拟结果的准确性。

结晶器内保护渣反应层与非反应层的混合行为如图 6 所示。随着拉坯的进行,在钢液与保护渣

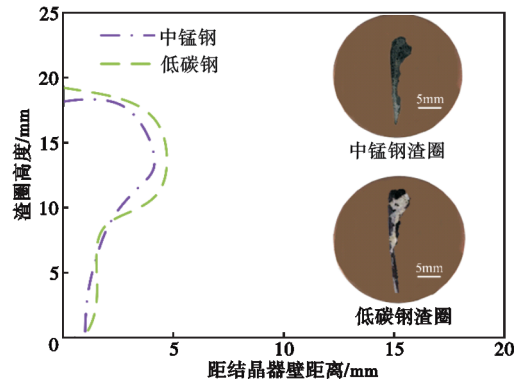


图 5 模型计算与实际的保护渣圈形状比较

Fig. 5 Comparison of calculated slag rim shape to plant measurements

的界面张力作用下形成弯月面,保护渣沿着弯月面与结晶器之间的通道向下流动,在凝固坯壳与结晶器之间形成渣膜。可以看到,弯月面附近保护渣的流动并没有严格按照下层(反应层)保护渣优先流入渣道的规律,而是上部初始层的部分保护渣也进入反应层,两部分保护渣经过一定程度的混合后进入渣道。值得注意的是,初始层与反应层在渣液内便发生了混合,随着钢渣反应和液态渣消耗的不断进行,熔池内的保护渣成分将逐渐趋于稳定。在靠近弯月面的熔渣池区域,在结晶器振动和弯月面流动的影响下保护渣流动速度较快,不同反应阶段的保护渣将快速混合。而在远离弯月面的熔渣池区域,结晶器振动的影响可以忽略,钢液流动速度相较于弯月面处也有大幅削弱,因此,保护渣将在熔渣池中停留更长时间,据此,可以判断在该区域的保护渣成分变化更大。通过保护渣在流动过程的

混合行为可知,黏附于结晶器内壁上的固态渣膜成分是经过不同阶段的不同混合程度而形成的,因此,具有一定的随机性,而渣圈中更多的为初始层成分。

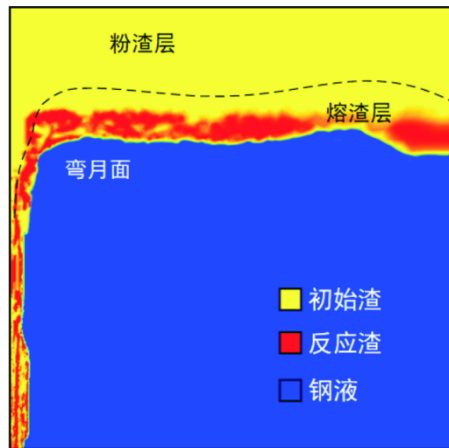


图6 结晶器内保护渣混合行为

Fig. 6 Mixing behavior of mold slag in the mold

### 2.3 结晶器内中锰钢坯壳凝固特征

中锰钢和低碳钢在宽面和窄面的坯壳厚度分布曲线如图7所示。两类钢从整体上看,由于窄面直接受到钢液流股的冲刷,从而导致窄面坯壳厚度增长缓慢,整体厚度小于宽面,特别是在结晶器中下部,窄面的坯壳生长率显著降低。而宽面的坯壳厚度在结晶器的漏斗区域呈现明显的不均匀性,这是由于漏斗区域的形状变化分散了主流股的流动方向,使得该区域形成了多股流动方向各异的钢液,同时伴随着由漏斗区向平板区过渡时对坯壳的强制变形,最终导致此处坯壳凝固的不均匀性。对比低碳钢坯壳厚度分布曲线与前人研究结果一致<sup>[18]</sup>,说明所选取的模型及参数较为合理。

相较于低碳钢,中锰钢坯壳与外界换热的能力稍弱,导致在结晶器内形成内部温度较高、坯壳厚度较薄的特点。可以看到,在结晶器出口处低碳钢

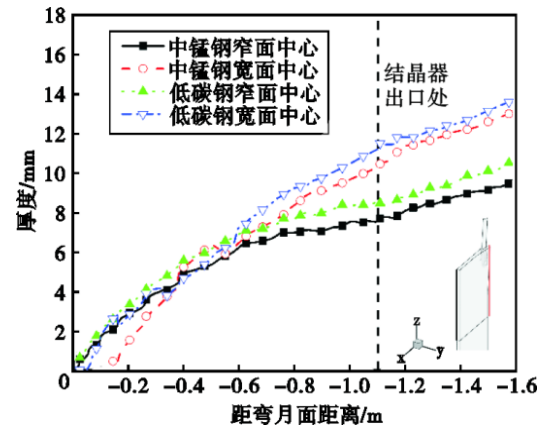


图7 宽面和窄面的坯壳厚度

Fig. 7 Thickness of slab shell on the wide and narrow faces

坯壳厚度为 8.6 mm,而中锰钢坯壳厚度仅为 7.73 mm,并且中锰钢坯壳厚度曲线波动更加显著。中锰钢坯壳凝固特征主要表现在两方面:一是在结晶器上部因保护渣成分变化易导致坯壳初始凝固不均匀,二是在结晶器中下部因坯壳传热慢导致坯壳较薄,特别是窄面容易出现坯壳过薄而导致的拉漏风险。

### 3 结论

(1) 受薄板坯结晶器钢液回流的影响,在结晶器中下部约宽面四分之一附近的温度波动较大,而中锰钢在典型温度波动区域的波动幅度更大。

(2) 中锰钢连铸过程中形成的渣圈尺寸略小,黏附于结晶器内壁上的固态渣膜成分是经过反应层和初始层不同阶段的不同混合程度而形成的,而渣圈中更多的为初始层成分,渣膜成分具有一定随机性。

(3) 中锰钢坯壳凝固特征主要表现在两方面:一是在结晶器上部因保护渣成分变化易导致坯壳初始凝固不均匀,二是在结晶器中下部因坯壳传热慢导致坯壳较薄,拉速为 5 m/min 时,窄面坯壳厚度仅为 7.73 mm。

### 参考文献

- [1] 赵征志,陈伟健,高鹏飞,等. 先进高强度汽车用钢研究进展及展望[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(12): 1059-1076.
- [2] 白韶斌,牛伟强,肖文涛,等. 中锰钢的研究进展及未来研究展望[J]. 热加工工艺, 2022, 51(14): 1-9.
- [3] Hu J, Li X Y, Meng Q W, et al. Tailoring retained austenite and mechanical property improvement in Al-Si-V containing medium Mn steel via direct intercritical rolling [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 855: 143904.
- [4] 汪水泽,高军恒,吴桂林,等. 薄板坯连铸连轧技术发展现状及展望[J]. 工程科学学报, 2022, 44(4): 534-545.
- [5] 明章生,栗克建,曹鹏军,等. 带钢无头连铸连轧技术发展现状[J]. 河北冶金, 2024(2): 1-8.
- [6] 朱苗勇. 高拉速连铸过程传输行为特征及关键技术探析[J]. 钢铁, 2021, 56(7): 1-12.
- [7] 李中原,赵九洲,平行板型薄板坯连铸结晶器中钢液流动、凝固及溶质分布的三维耦合数值模拟[J]. 金属学报, 2006, 42

- (2): 211-217.
- [8] 王晓红, 沈巧珍, 朱必炼, 等. CSP连铸结晶器内三维流场与温度场的数值模拟[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2006, 29(4): 335-338.
- [9] 胡 硕, 王朋飞, 朱立光, 等. 漏斗形薄板坯结晶器内铸坯传热分析[J]. 钢铁, 2017, 52(2): 33-37.
- [10] Yang J, Wang Y N, Ruan X M, et al. Effects of manganese content on solidification structures, thermal properties, and phase transformation characteristics in Fe-Mn-C steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46(3): 1353-1364.
- [11] 马晓莉, 于建刚, 陈翠欣, 等. 成分对高锰合金钢组织和变形特性的影响[J]. 特殊钢, 2008, 29(4): 19-21.
- [12] Kim M S, Lee S W, Cho J W, et al. A reaction between high Mn-high Al steel and CaO-SiO<sub>2</sub>-type molten mold flux: Part I. composition evolution in molten mold flux[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2013, 44(2): 299-308.
- [13] Yang J, Zhu M Y. Evolution of compositions and properties of CaO-SiO<sub>2</sub> based mold flux for continuous casting high Mn steel [J]. ISIJ International, 2016, 56(12): 2191-2198.
- [14] Wu T, He S P, Zhu L L, et al. Study on reaction performances and applications of mold flux for high-aluminum steel [J]. MATERIALS TRANSACTIONS, 2016, 57(1): 58-63.
- [15] Yang J, Wang L J, Li Y, et al. Modeling of flux reaction and mixing in continuous casting mold of medium Mn steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022, 53(3): 1516-1525.
- [16] 张剑君. 高品质钢薄板坯连铸关键技术研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2019.
- [17] Yang J, Cai Z Z, Chen D F, et al. Characteristics of slag infiltration in high-Mn steel castings [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, 50(2): 1104-1113.
- [18] 张晓峰. CSP结晶器钢液流动及传热行为对薄板坯表面纵裂的影响[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.