

ER70-Ti 钢结晶器保护渣渣膜分布数值模拟

王杏娟^{1,2}, 孔麒畅^{1,2}, 朴占龙^{1,2}, 朱立光³, 魏天烁^{1,2}

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063210; 2. 河北省高品质钢连铸技术创新中心, 河北 唐山 063000;
3. 河北科技大学材料与工程学院, 河北 石家庄 050000)

摘 要: CaO-Al₂O₃-TiO₂ 基专用保护渣有效解决了 ER70-Ti 钢生产中的钢渣界面反应严重的难题, 但是否能形成合理结构的液/固渣膜, 对于进一步提升铸坯质量意义重大。文中利用有限元软件建立了 ER70-Ti 钢连铸结晶器传热模型及渣膜传热模型, 分析了结晶器内液/固渣膜沿拉坯方向的不均匀分布, 并探讨了拉速、浇注温度等工艺参数对液态渣膜分布的影响。结果表明: 在结晶器出口处, 铸坯侧的渣膜温度范围为 777.87 ~ 1 113.3 °C; 结晶器侧渣膜温度较低, 为 89.92 ~ 450.54 °C。沿拉坯方向, 液态渣膜的厚度逐渐减小, 而固态渣膜厚度逐渐增加, 最大厚度可达 1.168 mm。进一步分析发现, 拉速的提高有利于增大液态渣膜的厚度, 拉速每提高 0.2 m/min, 液态润滑区的长度平均可延长 40 mm。当浇注温度从 1 530 °C 升高到 1 550 °C 时, 表面中心处液态渣膜厚度从 0.252 mm 增加到 0.272 mm, 结晶器出口处液态渣膜厚度从 0 mm 增加到 0.036 mm。

关键词: ER70-Ti 钢; 凝固传热; 渣膜结构; 数学模拟

中图分类号: TF777

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)02-0127-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.02.018

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Numerical simulation of slag film distribution in protective slag of ER70-Ti steel crystalliser

WANG Xingjuan^{1,2}, KONG Qichang^{1,2}, PIAO Zhanlong^{1,2}, ZHU Liguang³, WEI Tianshuo^{1,2}

(1. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 2. Hebei High Quality Steel Continuous Casting Technology Innovation Centre, Tangshan 063000, Hebei, China; 3. College of Materials and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050000, Hebei, China)

Abstract: The CaO-Al₂O₃-TiO₂-based protective slag effectively solves the problem of serious slag interface reaction in the production of ER70-Ti steel, but it is still unknown whether a liquid/solid slag film with reasonable structure can be formed. In this study, the finite element software was used to establish a heat transfer model and a slag film heat transfer model for ER70-Ti steel, to analyse the changes of liquid/solid slag film in the crystallizer and to explore the influence of process parameters on the distribution of liquid slag film. The results show that the temperature of the slag film on the billet side ranges from 777.87 to 1 113.3 °C at the exit of the mould; the temperature of the slag film on the mould side is lower, ranging from 89.92 to 450.54 °C. Along the direction of billet drawing, the thickness of liquid slag film decreases gradually, while the solid slag film thickens gradually, and the maximum thickness is up to 1.168 mm. The increase of drawing speed is conducive to the increase of the thickness of liquid slag film, and every increase of the drawing speed by 0.2 m/min, the liquid lubrication

收稿日期: 2024-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52374335, 51974133, 52304350); 河北省基本科研业务费资助项目 (JST2022002); 唐山市科技计划资助项目 (23130204E)

作者简介: 王杏娟, 1978 年出生, 女, 河北邢台人, 博士, 教授, 长期从事冶金工程及连铸方面的基础研究工作, E-mail: wxingjuan@ncst.edu.cn。

zone can be lengthened by an average of 40 mm. When the pouring temperature is increased from 1 530 to 1 550 °C, the thickness of the liquid slag film at the centre of the surface increases from 0.252 to 0.272 mm, and the liquid slag film thickness at the outlet of the crystalliser increased from 0 to 0.036 mm.

Key words: ER70-Ti steel, solidification heat transfer, slag film structure, mathematical simulation

0 引言

ER70-Ti 钢凭借出色的耐蚀性、高强度等性能,在化工、桥梁、车辆、船舶等领域具有广阔应用前景^[1]。然而,在连铸过程时,钢液中 [Ti] 易与保护渣发生化学反应生成高熔点化合物,阻碍保护渣顺利流入结晶器与铸坯之间的缝隙,恶化铸坯质量^[2-3]。为解决此问题,课题组开发了 ER70-Ti 钢专用 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 基保护渣^[4-5]。将该保护渣应用于 ER70-Ti 钢生产,并在生产过程中捞取不同时刻的保护渣渣条,发现渣条成分变化不大,且未发生钢渣界面反应,说明该保护渣理化性能较为稳定,且在浇铸过程中没有发生漏钢事故。对浇铸结束后的铸坯表面形貌进行观察,发现铸坯表面没有明显的裂纹及表面缺陷,并且振痕较为均匀,说明该保护渣能够在结晶器内有效地保证坯壳的润滑和控制传热^[6]。综上所述, $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 基保护渣能够满足 ER70-Ti 钢的生产,但由于结晶器内部的高温高压环境,导致该保护渣在结晶器内具体的演变过程无法直接观察,因此有必要通过数值模拟的方法演示该保护渣在结晶器内的分布状态。

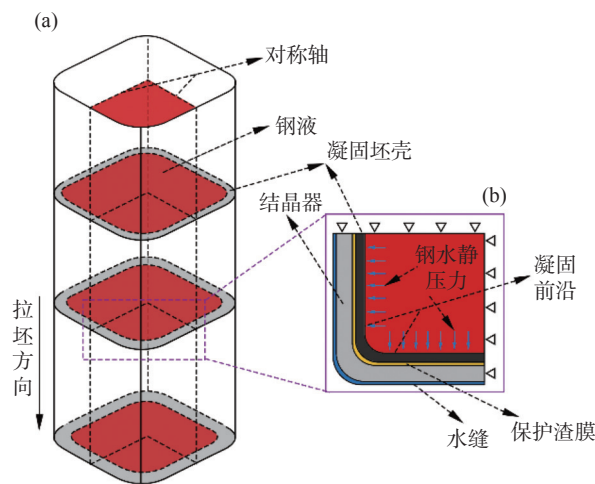
在 ER70-Ti 钢连铸过程中,保护渣在结晶器内形成的渣膜结构对铸坯的润滑和传热起着重要的作用,直接影响着铸坯的质量。MENG 等^[7]建立了铸坯-结晶器界面传热模型,研究了渣膜沿拉坯方向的分布变化,但未考虑渣膜结构的变化。SARAWAT 等^[8]通过二维应力-应变切片模型,预测了 120 mm×120 mm 方坯结晶器中液渣、固渣和气隙厚度变化。HAN 等^[9]将结晶器保护渣渣膜视为固定厚度,模拟了板坯凝固的热力学耦合行为,但忽视了保护渣渣膜结构变化对传热的影响。蔡兆镇等^[10]利用相似模型,得到了板坯凝固收缩率和保护渣渣层分布、气隙厚度,也没有涉及到其他钢种。NIU 等^[11]建立了 2 200 mm×2 200 mm 板坯三维应力-应变模型,分析了窄面锥度对气隙的影响,但缺乏对渣膜传热行为的解析。YANG 等^[12]建立了传热-流体耦合模型,分析了渣膜的演变,但忽视了应力应变对坯壳的影响。

上述研究虽然从不同角度对连铸过程中渣膜行为进行了探讨,但都存在一定局限,未能对 ER70-Ti 钢 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 基专用保护渣在结晶器内的分

布状态及与工艺参数的关系进行系统解析,难以为 ER70-Ti 钢连铸工艺的优化提供全面指导。因此,针对 ER70-Ti 高钛钢 165 mm×165 mm 小方坯生产工艺,建立了 1.7 m/min 拉速条件下的结晶器传热凝固模型和保护渣渣膜传热模型,描述了 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 基专用保护渣在结晶器内的结构演变过程,并模拟分析了工艺参数对渣膜状态的影响规律。该研究有利于揭示 ER70-Ti 钢专用保护渣在结晶器内的分布状态,为制定优化工艺参数、改善铸坯质量提供了理论依据。

1 数学描述

如图 1 所示,采用顺序耦合法建立 165 mm×165 mm 小方坯传热凝固模型,在此基础上建立保护渣渣膜传热模型分析渣膜结构的演变。具体的计算过程如下:



(a) 铸坯计算流程; (b) 1/4 铸坯模型

图 1 切片建模示意

Fig. 1 Schematic of slice modelling

1) 建立铸坯的有限元模型,并施加了包括结晶器的传热条件和初始温度(即浇注温度)等相关条件,进行铸坯非稳态传热分析。

2) 利用 ANSYS 提供的单元生死功能,将液相和两相区单元暂时忽略,以排除它们对热应力分析的影响。

3) 通过施加当前时刻的温度载荷、钢水静压力等相关边界条件,对铸坯进行应力分析。

4)以上一步得到的应力分析结果为基础,同时施加当前时刻的温度场作为体载荷,采用连续载荷步的方法继续进行热应力分析。

5)在模拟计算过程中,通过分析坯壳表面的位移大小来判断铸坯是否渗入结晶器。如果发生渗入,按照结晶器的锥度对相应节点的位移进行约束,并以上一时刻的应力结果作为初应力,重新进行热应力计算。

6)反复进行连续热应力分析及表面位移判断,进行循环计算,直至铸坯达到结晶器出口位置。

通过上述计算步骤得到铸坯的收缩率,以此收缩率建立保护渣渣膜传热模型,研究保护渣液/固渣膜的演变过程。

1.1 结晶器传热凝固模型

1.1.1 基本方程

在结晶器的振动作用下,结晶器内钢液发生着复杂的流动行为和传热行为,因此在建立铸坯传热凝固模型过程之前作以下假设^[13]:

1)连铸过程处于稳定状态,钢液初始温度为浇注温度。

2)初生坯壳的初始应力为0,初始凝固坯壳与铜壁紧密接触,铜壁与坯壳表面设置面-面接触,铜壁为刚性面,坯壳为柔性面。

3)忽略沿铸坯拉坯方向的传热,将三维稳态传热简化为二维非稳态传热。

4)钢的物理性能各向同性,且各物性参数仅与温度有关。

5)采用有效导热系数等效液相区的对流传热,把铸坯传热简化为导热过程。

6)在铸坯液态中心所处的对称面上施加对称位移边界条件。

7)在钢液上表面施加向下的位移约束。

8)在钢液凝固位置节点上施加钢水静压力。

通过上述的简化,铸坯在结晶器传热简化为二维非稳态导热过程,采用傅里叶传热方程进行描述:

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial \tau}=\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)\right]+q_v\quad (1)$$

式中: T —铸坯温度,℃; ρ —钢的密度, kg/m^3 ; c —铸坯比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; λ —铸坯导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; q_v —钢液的凝固潜热, J/kg 。

1.1.2 定解条件

1)初始条件

连铸时,二维切片一开始位于结晶器弯月面处,此时整个切片的温度分布 $T(t=0)$ 为钢液浇注温度 T_c ,即:

$$T(x,y,t=0)=T_c\quad (2)$$

2)边界条件

用第二类边界条件,铸坯表面的热流密度随着时间变化,即在结晶器与铸坯的接触面给定热流^[14]:

$$q=2.688-0.335\sqrt{\frac{z}{v}}\quad (3)$$

式中: q —铸坯与结晶器间的热流密度, MW/m^2 ; z —距弯月面的距离,m; v —拉坯速度,m/s。

1.1.3 模型建立及参数

根据 165 mm×165 mm 小方坯结晶器的结构数据,利用 ANSYS 有限元分析软件建立铸坯传热/凝固模型,采用了 PLANE13 单元类型,并利用了 ANSYS 提供的 MAPPED 方式进行网格划分,见图 2。

模型使用的 ER70-Ti 钢种成分如表 1 所示。

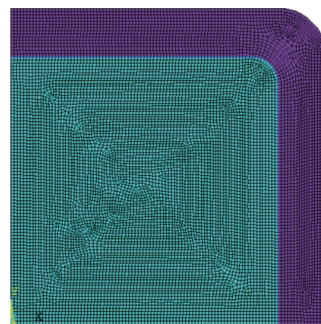


图2 有限元网格划分
Fig. 2 Finite element meshing

表1 ER70-Ti 钢成分
Table 1 ER70-Ti steel composition

C	Si	Mn	S	P	Ni	Mo	Cr	Ti
0.07~0.09	0.48~0.58	1.58~1.68	≤0.008	≤0.01	0.8~0.9	0.38~0.39	0.18~0.28	0.09~0.12

利用上表中的 ER70-Ti 钢成分,使用 Jamtpro 软件计算铸坯的物性参数,包括密度、导热系数、比热容、弹性模量、泊松比、热线膨胀系数等。

1.2 保护渣传热模型

连铸结晶器中,传热一般可以分为水平传热和

垂直传热。液态渣膜控制铸坯的润滑,固态渣膜控制着结晶器与铸坯之间的传热。结晶器弯月面处的保护渣一般由两层结构组成,即液态层和固态层(结晶层和玻璃层)。这两层不同的渣膜结构有着不同的热阻,因而在铸坯与结晶器之间的辐射传热和传

导热热中起着不同的作用。由于渣膜演变过程相当复杂,因此需要一些假设来简化计算过程和结果,但在实际应用中,需要考虑更多的因素来计算渣膜的分布^[15]:

1) 保护渣渣膜的状态分布受铸坯与结晶器热面表面温度、自身熔化温度以及铸坯与结晶器之间的缝隙的影响。

2) 假设保护渣渣膜表面平坦,并且渣膜分布是均匀的。如果表面存在凹凸不平或者不均匀的分布,这些因素将会被简化或者忽略。

3) 液态渣膜具有良好的流动性,因此,只要液态渣膜存在,铸坯与结晶器之间的缝隙就会被保护渣完全填满。

4) 不考虑保护渣固态渣膜中玻璃相、结晶相等多相物质的区别,均视为固态渣膜,从而将其物性参数均一化。

5) 由于液态渣膜的厚度较小,模型仅考虑渣膜的传导传热和辐射传热。

6) 将保护渣渣膜的热阻恒定且界面热阻不随着渣膜厚度变化而变化。

1.2.1 模型建立及物性参数

以结晶器和铸坯间保护渣渣膜为研究对象,建立三维渣膜传热有限元模型,如图 3 所示。保护渣渣膜传热模型中采用 SOLID70 单元类型,在划分网格时,采用映射方式划分网格,在保证各单元连续的基础上,为保证网格质量,网格边长为 0.000 02 m。

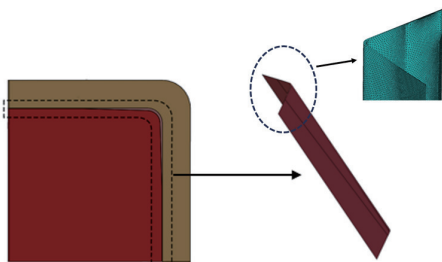


图 3 渣膜传热模型
Fig. 3 Slag film heat transfer model

CaO-Al₂O₃-TiO₂ 基保护渣的物性参数在试验的条件下测得,如表 2 所示。

表 2 保护渣的物性参数
Table 2 Physical parameters of protective slag

熔化温度/℃	黏度/(Pa·s)	热阻/(W·m ⁻² ·℃ ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
1 070	0.37	1.34	1 500	1.45

2 结果与分析

2.1 结晶器保护渣渣膜状态分布

利用后处理软件对数据结果进行整理,由于保

护渣渣膜在结晶器壁和铸坯之间存在极为复杂的温度场且渣膜两侧温度施加的边界条件相同,因此渣膜两侧之间的温度差值直接反映了渣膜内的温度梯度,如图 4 所示。

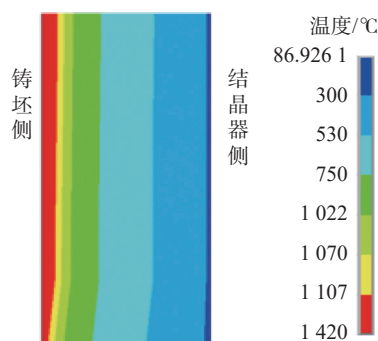


图 4 渣膜横向温度梯度
Fig. 4 Slag film transverse temperature gradient

结合图 3 保护渣渣膜模型,将铸造方向视为 z 坐标,弯月面处和结晶器出口处分别为 $z=0$ mm 和 $z=800$ mm。由于保护渣渣膜与铸坯一样均具有对称性,选取 1/4 模型,则横向坐标 $x=0$ mm 和 $x=82.5$ mm 分别代表保护渣渣膜表面中心与角部,如图 5 所示。

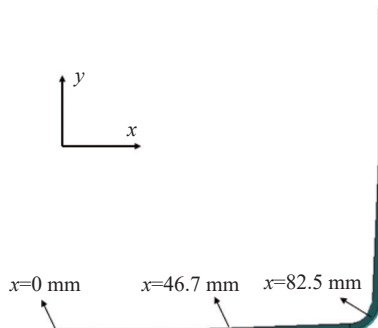


图 5 渣膜坐标位置
Fig. 5 Slag film coordinates location

利用后处理软件得到保护渣渣膜温度分布,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,铸坯侧的保护渣渣膜温度高,结晶器侧保护渣渣膜温度低。随着连铸的进行,两侧保护渣渣膜温度均呈现下降的趋势。对铸坯侧渣膜分析,在 $z=0$ mm, $x=0$ mm 处保护渣渣膜的温度为 1 420 ℃, $x=46.7$ mm 处渣膜温度为 1 412.80 ℃, $x=82.5$ mm 的渣膜温度为 1 410.40 ℃。到达结晶器出口时, $x=0$ mm 处保护渣渣膜的温度为 1 113.3 ℃, $x=46.7$ mm 处渣膜温度为 1 070.10 ℃,此时渣膜温度正好等于保护渣的熔化温度,此时渣膜呈现液态。随着 x 横向距离的增加,到达 $x=82.5$ mm 处保护渣渣膜的温度为 777.87 ℃,此位置渣膜温度较低,渣膜完全凝固变为固态渣膜。由于

结晶器冷却强度高,因此结晶器侧保护渣渣膜温度相对较低,在 $z=0\text{ mm}$ 处, $x=0\text{ mm}$ 、 $x=46.7\text{ mm}$ 和 $x=82.5\text{ mm}$ 三个不同位置处渣膜温度为 850.77°C 、 730.16°C 和 620.15°C ,到达结晶器出口处温度分别为 450.54°C 、 352.24°C 和 89.92°C 。由于角部受到二维冷却,冷却强度高,因此渣膜在结晶器角部的温度下降最为明显。

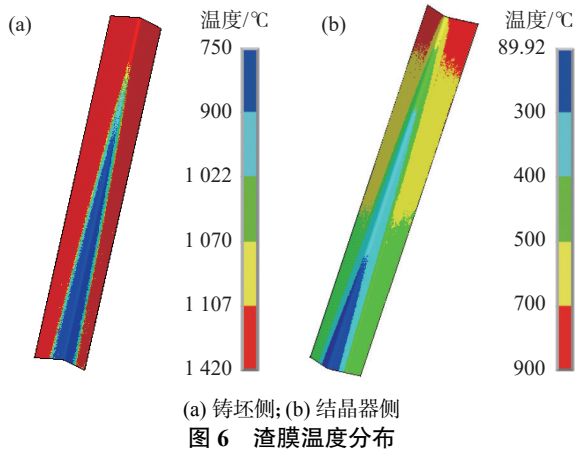


Fig. 6 Slag film temperature distribution

2.1.1 液态渣膜

由于铸坯逐渐凝固,表面温度开始逐渐降低,渣膜沿着拉坯方向温度逐渐下降,液态渣膜厚度也随着拉坯的进行逐渐降低。结晶器内典型位置的保护渣液态渣膜厚度变化趋势如图7所示。

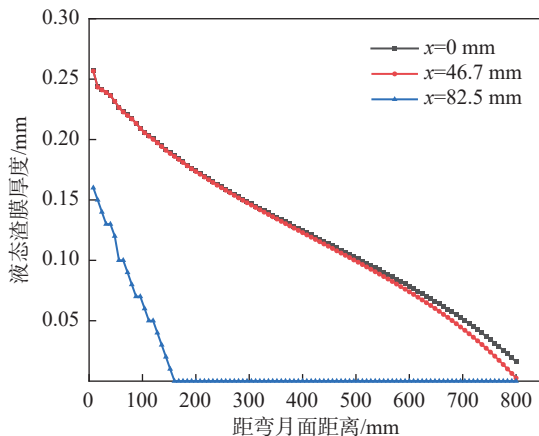


图7 液态渣膜沿浇铸方向厚度变化

Fig. 7 Thickness variation of liquid slag film along casting direction

由图7分析可知,在 $z=0\text{ mm}$ 处液态渣膜初始厚度在 $0.16\sim 0.26\text{ mm}$ 变化,厚度最大相差 0.10 mm 。其中在 $z=0\text{ mm}$, $x=0\text{ mm}$ 处由于铸坯温度高,液态渣膜的厚度为 0.26 mm ,沿着保护渣渣膜横向距离的增加,在 $x=0\text{ mm}$ 至 $x=46.7\text{ mm}$ 时液态渣膜厚度缓慢减小,当 $x=46.7\text{ mm}$ 至 $x=82.5\text{ mm}$ 处

由于结晶器角部的二维冷却使得铸坯温度急剧下降,这也会使保护渣渣膜的温度下降,从而导致液态渣膜变薄。在 $x=82.5\text{ mm}$ 处保护渣液态渣膜的厚度为 0.16 mm 。在 z 方向上,液态渣膜厚度呈下降趋势,在 $x=82.5\text{ mm}$ 处保护渣液态渣膜最早变为固态渣膜,其对应的液态润滑区长度为 152 mm 。随着铸坯的下拉,到达结晶器出口处在 $x=0\text{ mm}$ 时,保护渣液态渣膜的厚度为 0.016 mm ,在 $x=46.7\text{ mm}$ 至 $x=82.5\text{ mm}$ 处已经完全由液态渣膜转变为固态渣膜。通过以上分析说明,在结晶器出口处存在液态渣膜,保证了拉坯过程中坯壳的全程润滑。

2.1.2 固态渣膜

由图6渣膜温度场分析可知,在 $z=0\text{ mm}$ 处存在固态渣膜与液态渣膜。结晶器内典型位置的固态渣膜厚度变化趋势如图8所示。

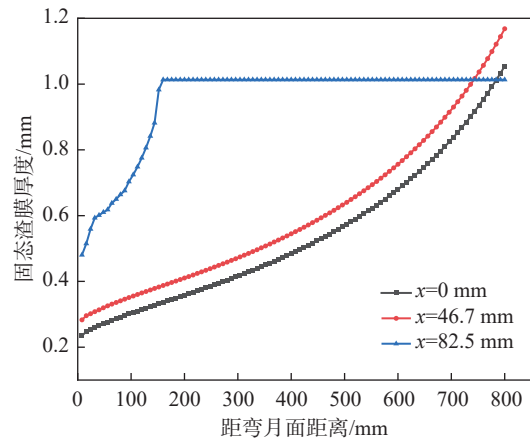


图8 固态渣膜沿浇铸方向的厚度变化

Fig. 8 Thickness variation of solid slag film along the casting direction

从图8中可以看出,与液态渣膜厚度的变化相反,在 $z=0\text{ mm}$ 处固态渣膜的厚度在 $0.23\sim 0.48\text{ mm}$ 内变化,渣膜厚度最大相差 0.25 mm 。在沿渣膜横向上,从表面中心到角部的固态渣膜厚度缓慢上升,在 $x=82.5\text{ mm}$ 处达到峰值为 0.48 mm 。这主要是因为靠近结晶器角部,角部受到二维传热冷却强度高,产生的固态渣膜厚。沿浇铸 z 方向, $x=0\text{ mm}$ 位置处的固态渣膜厚度从由初始的 0.234 mm 增加到 1.050 mm , $x=46.7\text{ mm}$ 处固态渣膜由原先的 0.283 mm 增长到 1.168 mm 。 $x=82.5\text{ mm}$ 处固态渣膜在 $z=152\text{ mm}$ 处停止生长,到达结晶器出口时此位置的固态渣膜的厚度为 1.01 mm 。分析可知,在表面中心处铸坯凝固收缩量小,导致渣膜厚度相比于其他地方要薄。在 $x=46.7\text{ mm}$ 处,由于渣膜温度正好等于保护渣的熔化温度,因此在结晶器出口也存在液态渣膜,使得固态渣膜的厚度一直增

加。而随着渣膜横向距离的增加,在 $x=82.5\text{ mm}$ 处位于结晶器角部,冷却强度高,使得结晶器角部的保护渣渣膜温度在 $z=152\text{ mm}$ 处就已低于保护渣的熔化温度,这就导致了液态渣膜提前凝固为固态渣膜并失去了液渣的补充,固态渣膜的厚度停止增长。

2.2 工艺参数对液态渣膜状态分布影响

2.2.1 拉速对液态渣膜分布的影响

为了研究拉速对保护渣液态渣膜厚度的影响,在保证其它工艺参数相同的情况下,模拟了1.5、1.7 m/min 和 1.9 m/min 三种不同拉速情况下形成的液态渣膜厚度。为了更直观地分析结果,选取了 $x=0$ 、46.7、82.5 mm 处渣膜的典型位置并提取了相对应的液态渣膜厚度,其中液态渣膜的厚度与拉速的变化关系如图9所示。

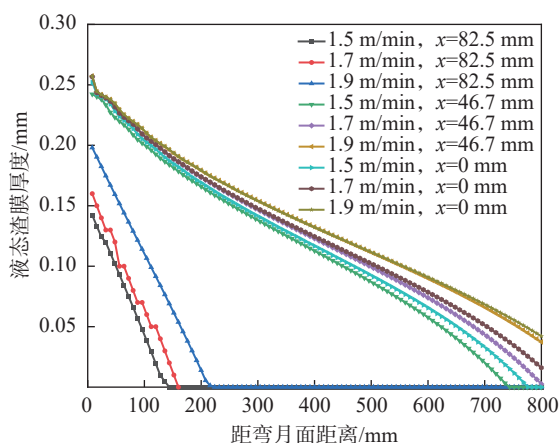


图9 拉速对液态渣膜厚度的影响

Fig. 9 Effect of drawing speed on slag film thickness

从图9中可以看出,液态渣膜的厚度随着拉速的提高而变厚。浇注方向 $z=0\text{ mm}$ 处,在 $x=0\text{ mm}$ 时,1.5、1.7 m/min 和 1.9 m/min 三种不同拉速下的液态渣膜初始厚度为0.252、0.26 mm 和 0.257 mm。沿着浇铸 z 方向,三种不同拉速液态渣膜的厚度逐渐减小,到达结晶器出口时三种不同拉速下的液态渣膜厚度为0、0.016 mm 和 0.042 mm。在 $x=46.7\text{ mm}$ 处,1.5、1.7 m/min 和 1.9 m/min 三种不同拉速下的液态渣膜初始厚度为0.242、0.256 mm 和 0.257 mm,到达结晶器出口时三种不同拉速下的液态渣膜厚度为0、0.002 mm 和 0.03 mm。而在 $x=82.5\text{ mm}$ 处初始液态渣膜的厚度为0.14、0.16 mm 和 0.19 mm,但与 $x=0\text{ mm}$ 和 $x=46.7\text{ mm}$ 不同的是,由于此位置在结晶器角部,冷却快导致液态渣膜厚度下降得更快,并在沿浇注 z 方向上一定位置处消失,其对应的润滑区间长度为136、152 mm 和 216 mm,从而导致铸坯在结晶器角部润滑不良。

总的来说,在液渣完全消失前,相同位置处保护渣液态渣膜厚度随拉速的提高而变厚。在 $z=0$ 处,不同拉速下的液态渣膜厚度在0.16~0.26 mm。拉速从1.5 m/min 提高到1.9 m/min,液态润滑区的长度由136 mm 增加到216 mm,拉速每提高0.2 m/min,液态润滑区长度平均提高40 mm。拉速过低,液态渣膜变薄,导致铸坯的润滑不良,恶化铸坯的性能。拉速过快,耗渣量降低,同时因生成的液态渣膜不均匀,造成传热不良,导致铸坯坯壳变薄,影响铸坯质量。因此,需采用合适的拉速以保证结晶器内铸坯的良好润滑。

2.2.2 浇注温度对液态渣膜分布的影响

在保证其它工艺参数不变的情况下,模拟了1530、1540、1550 °C 三种不同浇注温度对液态渣膜厚度的影响。选取了结晶器内三个典型位置 $x=0$ 、46.7、82.5 mm 处的液态渣膜厚度,得到了液态渣膜厚度沿浇铸方向的变化趋势,如图10所示。

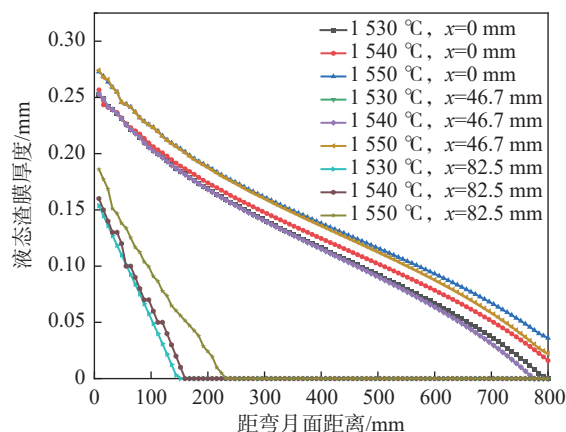


图10 浇注温度对液态渣膜厚度的影响

Fig. 10 Effect of casting temperature on the thickness of liquid slag film

分析可知,由于浇注温度提高,液态渣膜厚度逐渐增厚。在 $z=0\text{ mm}$ 处,液态渣膜的厚度在0.16~0.272 mm 范围内变化,最大厚度相差0.112 mm。在 $x=0\text{ mm}$ 时,1530、1540 °C 和 1550 °C 不同浇注温度下液态渣膜初始厚度为0.252、0.26 mm 和 0.272 mm,浇注温度1530 °C 时,在沿拉坯方向 $z=792\text{ mm}$ 处液态渣膜消失,而浇注温度1540 °C 和 1550 °C 在结晶器出口液态渣膜的厚度分别为0.02 mm 和 0.036 mm。在 $x=46.7\text{ mm}$ 时,浇注温度1540 °C 和 1550 °C 在结晶器出口液态渣膜厚度为0.01 mm 和 0.022 mm,浇注温度1530 °C 下液态渣膜厚度在 $z=768\text{ mm}$ 处消失。对于 $x=82.5\text{ mm}$ (结晶器角部)三种不同浇注温度下的液态渣膜厚度初始位置在0.153~0.186 mm 范围内变化,浇注温度从1530 °C 升高至1550 °C 时,角部液态润滑区

的长度从144 mm延长至224 mm,增加了80 mm。综上可知,浇注温度的提高增加了液态润滑区的长度,但浇注温度过高可能导致初始坯壳厚度过薄,增加漏钢的几率。因此要选择合适的浇注温度来保证铸坯的润滑和合理的坯壳厚度。

3 结论

1)随着拉坯的进行,渣膜温度总体下降,在弯月面处铸坯侧的渣膜温度在1 410.4~1 420.0 °C范围内变化,结晶器侧渣膜温度在620.16~850.77 °C范围内。结晶器出口处,结晶器侧渣膜角部温度最低为89.92 °C。

2)当拉速为1.7 m/min时,液态渣膜沿拉坯方向逐渐变薄,固态渣膜则逐渐增厚。弯月面处,液态

渣膜最厚可达0.26 mm,并一直延伸至结晶器出口,能够满足ER70-Ti全程润滑需求;而固态渣膜在结晶器出口处最厚可达1.168 mm。

3)提高拉速有利于增大液态渣膜厚度。当拉速从1.5 m/min提高到1.9 m/min时,弯月面处表面中心处液态渣膜由0.252 mm增至0.26 mm;结晶器角部液态润滑区也由136 mm延长至216 mm,拉速每提高0.2 m/min,液态润滑区平均可延长40 mm。

4)浇注温度升高也会增大液态渣膜厚度。当温度从1 530 °C升至1 550 °C时,弯月面表面中心处液态渣膜厚度由0.252 mm增至0.272 mm;结晶器角部液态润滑区则分别延长至距弯月面144、152 mm和224 mm。

参考文献

- [1] LIU Y Y, CHEN Z Y, JIN T N, *et al.* Current status and outlook of the development of high temperature titanium alloys at 600 °C[J]. *Materials Herald*, 2018, 32(11): 1863-1869.
(刘莹莹, 陈子勇, 金头男, 等. 600 °C 高温钛合金发展现状与展望[J]. *材料导报*, 2018, 32(11): 1863-1869.)
- [2] WANG X J, JIN H B, ZHU L G, *et al.* Influence of titanium content in steel on slag-gold reaction in continuous casting mould[J]. *Iron and Steel*, 2020, 55(12): 46-55.
(王杏娟, 靳贺斌, 朱立光, 等. 钢中钛含量对连铸结晶器内渣金反应的影响[J]. *钢铁*, 2020, 55(12): 46-55.)
- [3] ZHU L G, ZHANG X S, LIU Z X, *et al.* Analysis and control of transverse cracks on the surface of ER70-Ti steel casting billets[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2020, 41(3): 166-171.
(朱立光, 张晓仕, 刘增勋, 等. ER70-Ti 钢铸坯表面横向裂纹分析及控制[J]. *钢铁钒钛*, 2020, 41(3): 166-171.)
- [4] WANG X J, WANG Y, ZHU L G, *et al.* Composition design of low reactivity continuous casting slag for high titanium steel[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2022, 43(4): 134-141.
(王杏娟, 王宇, 朱立光, 等. 高钛钢专用低反应性连铸保护渣成分设计[J]. *钢铁钒钛*, 2022, 43(4): 134-141.)
- [5] PIAO Z L, WANG X J, ZHANG C J, *et al.* Behaviour of steel-slag interface reaction in continuous casting crystallizer of high titanium steel[J]. *Iron and Steel*, 2022, 57(3): 61-70.
(朴占龙, 王杏娟, 张彩军, 等. 高钛钢连铸结晶器内钢-渣界面反应行为[J]. *钢铁*, 2022, 57(3): 61-70.)
- [6] PIAO Z L. Development and metallurgical characterisation of CaO-Al₂O₃-TiO₂ based protective slag for high titanium steel [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
(朴占龙. CaO-Al₂O₃-TiO₂ 基高钛钢用保护渣开发及冶金特性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.)
- [7] MENG Y, THOMAS B G. Heat-transfer and solidification model of continuous slab casting: CON1D[J]. *Metallurgical and materials transactions B*, 2003, 34: 685-705.
- [8] SARASWAT R, MAIJER D M. The effect of mould flux properties on thermo-mechanical behaviour during billet continuous casting[J]. *ISIJ international*, 1999, 47(1): 95-104.
- [9] HAN H N, LEE J E, YEO T J. A finite element model for 2-dimensional slice of cast strand[J]. *ISIJ international*, 1999, 39(5): 445-454.
- [10] CAI Z Z, ZHU M Y. Study on thermal behaviour of steel solidification process in slab continuous casting mould I. Mathematical modelling[J]. *Journal of Metals*, 2011, 47(6): 669-675.
(蔡兆镇, 朱苗勇. 板坯连铸结晶器内钢凝固过程热行为研究 I. 数学模型[J]. *金属学报*, 2011, 47(6): 669-675.)
- [11] NIU Z Y, CAI Z Z, ZHU M Y. Dynamic distributions of mold flux and air gap in slab continuous casting mold[J]. *ISIJ International*, 2019, 59(2): 283-292.
- [12] YANG J, CHEN D F, LONG M J, *et al.* An approach for modelling slag infiltration and heat transfer in continuous casting mold for high Mn-high Al steel[J]. *Metals*, 2019, 10(1): 51.
- [13] SHAO K K. Research on cavity design of new billet continuous casting mould [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
(邵凯凯. 新型方坯连铸结晶器腔形设计研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.)
- [14] SAVAGE J, PRITCHARD W H. The problem of rupture of the billet in the continuous casting of steel[J]. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1954, 178(3): 269-277.
- [15] HU P H. Study on numerical calculation of protective slag slag film/air gap and its thermal resistance in crystalliser[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
(胡鹏宏. 结晶器保护渣渣膜/气隙及其热阻数值计算研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.)