

## 结晶器中弯月面区域保护渣液流场的数学模拟

漆 鑫 唐 萍 文 光 华 苗 胜 田  
(重庆大学材料与工程学院, 重庆 400044)

**摘 要** 用商业软件 Fluent 对弯月面处保护渣的流场分布和弯月面受力情况进行了数学模拟和分析。对于一个振动周期, 在时间  $t = 0$  时, 保护渣的流入量最大, 此时保护渣对凝固坯壳产生负压, 为使保护渣容易流入, 应尽量减小此时的负压, 减小保护渣与结晶器之间的摩擦力。模拟结果与南钢厂坯连铸实际情况一致。

**关键词** 方坯连铸 结晶器 弯月面 保护渣流场 数学模拟

## Math Modeling of Mold Flux Flow Field in Meniscus Region

Qi Xin, Tang Ping, Wen Guanghua and Miao Shengtian  
(School of Material and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

**Abstract** The math modeling of distribution of flux flow field and analysis on pressure of meniscus in mold have been carried out by commercial software Fluent. The flow rate of flux was maximum at time  $t = 0$  during a oscillation circle, at that time the minus pressure on solidified shell was produced by flux, therefore it should be to decrease the minus pressure in time as far as possible, in order to decrease frictional force for flux easy flowing in. The modeling results conform to the real condition of billet concasting at Nanjing Steel.

**Material Index** Billet Concasting, Mold, Meniscus, Flux Flow Field, Math Modeling

在弯月面的研究中, 通常假设弯月面为自由弹性层并可自动恢复平衡<sup>[1]</sup>。有些作者<sup>[1,2]</sup>曾对保护渣的流动润滑行为进行过计算, 计算在几何形状和计算方法上采用的都是近似处理。本文利用大型商业软件 Fluent 对情况复杂的弯月面区域求解 N-S (Navier Stokes) 方程。

### 1 模型的建立

#### 1.1 弯月面区域模型的建立

连铸结晶器弯月面区域的定义为<sup>[3]</sup>: 从弯月面根部以下 45 mm 到根部以上 45 mm, 从结晶器内壁到离壁 20 mm 处的区域(图 1)。弯月面形状曲线由 Bikerman 方程<sup>[3]</sup>给出, 弯月面假设为自由弹性层并可自动恢复平衡, 弯月面以上区域是本文的计算区域。渣池中液渣可视为不可压非定常粘性流体。

#### 1.2 数学模型的建立

在结晶器内的流体流动的数学模拟方面, 主要用连续性方程、动量方程(N-S 方程)<sup>[1]</sup>来描述流体在结晶器内的物理过程, 本文利用大型商业软件 Fluent 对弯月面区域求解这两个方程。

边界条件设置为: 左边界  $u = 2\pi f A \cos 2\pi f t$ ; 式

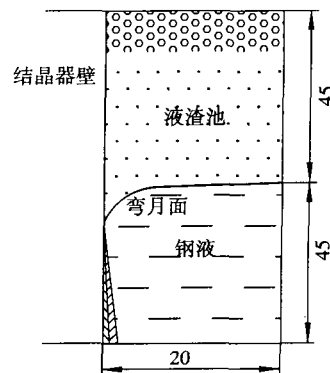


图 1 结晶器中弯月面模型示意图  
Fig. 1 Schematic of model of meniscus in mold

中,  $f$ - 结晶器振动频率,  $A$ - 结晶器振幅,  $t$ - 结晶器振动时间。右边界  $u = 0$ ; 上边界  $u = 0$ ; 下边界  $C$  点处液渣流动速度  $u = u_c \cdot \hat{BC} / \hat{AB}$  (图 2)。

因为在渣池左边界处, 渣随结晶器一起振动, 故左边界条件取结晶器振动速度。渣池上边界是粉渣层与烧结层相连接的界面, 该界面处质点向下运动的速度很小与保护渣的熔化特性有关, 认为是零。

右边界和下边界的确定基于以下分析<sup>[4]</sup>: 在

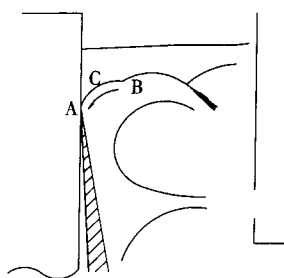


图 2 弯月面处钢液面流动模型  
Fig.2 Flow model of molten steel at meniscus

结晶器弯月面区域,渣在渣-钢界面处的运动速度是个比较复杂的问题,弯月面由固相区、固-液两相区和液相区组成。曾用水和油或塑料粒子和油模拟了板坯卷渣现象<sup>[5]</sup>,发现靠近结晶器窄壁处油层较薄,在水口和结晶器窄壁中间油层较厚,水口周围的油层居中。在水口与结晶器壁之间居居一段处的钢液面容易出现卷渣。随着水流动速度的增加,油层较厚处开始有油卷入水中,说明靠近结晶器窄壁处钢液流动速度很小或出现死角。

在结晶器弯月面区域,由于温度相对较低使钢液凝固成坯壳后沿结晶器下移,这就需要弯月面处不断补充新的钢液,从而形成一股与中央波峰流动方向相反的钢液(图 2),假设在这两种流动方向不同的钢液之间存在一段流动速度为零的

静止区,将它作为计算区域的右边界。

由于结晶器弯月面根部 A 点处钢液初始凝壳速度为拉坯速度,认为渣-钢界面 BCA 上质点的速度是由静止线性增加到拉坯速度,于是界面上 c 点处的线速度为  $u = u_c \cdot \widehat{BC} / \widehat{AB}$ 。

## 2 液渣流场分布的计算和分析

利用南京钢铁公司电炉厂连铸机的振动参数(表 1),计算结晶器弯月面区域的流场。边界条件设为:左边界  $u = 0.077 \cos 15.708t$ ;右边界  $u = 0$ ;上边界  $u = 0$ ;下边界 C 点处液渣流动速度  $u = 0.0392 \cdot \widehat{BC} / \widehat{AB}$ ;液渣粘度  $\eta = 0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。经过计算得到的一个周期内的液渣流场动态分布情况示于图 3。由图 3 可知:

(1) 渣池中液渣的流动呈周期性变化。在不同时刻(t)、不同的结晶器振动速度下的流动速度分布不同。表 2 列出了一个振动周期内渣池中液渣流动速度的分布情况,可看出: $t = 0$  时,钢液产生顺时针漩涡,结晶器弯月面根部的渣流分成 3 股:一股沿漩涡运动,一股返回,一股进入缝隙,流量较大这是渣耗的主要来源; $t = 1/4, 3/4$  周期时,整个区域速度较小,弯月面区域的流场变化不大。 $t = 1/2$  周期时,钢液产生逆时针漩涡,当漩涡与渣-钢界面接触时,渣流分成 2 股:一股继续向前

表 1 目前南钢连铸机结晶器振动参数特点(振程 10 mm)

Table 1 Characteristics of mold oscillation parameters of concaster at Nanjing steel in present (oscillation distance 10 mm)

断面/mm × mm	拉速/(m·min <sup>-1</sup> )	负滑脱率/%	负滑脱时间/s	振动频率/(次·min <sup>-1</sup> )	结晶器导前/mm	振痕间距/mm
150 × 210	1.0 ~ 1.7	40, 41	0.19 ~ 0.13	131 ~ 195	6.0	< 10
150 × 150	2.0 ~ 2.8	35	0.15 ~ 0.11	154 ~ 193	3.9	14 ~ 16
130 × 130	2.8 ~ 3.2	33	0.11 ~ 0.10	174 ~ 192	3.3	15 ~ 16

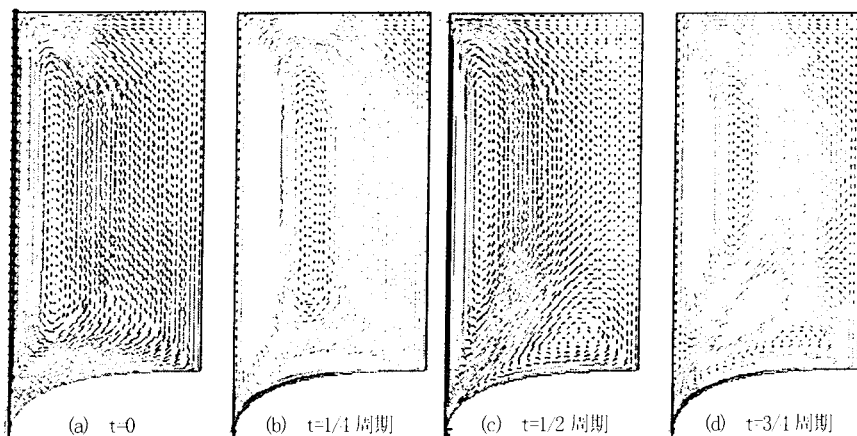


图 3 一个振动周期内渣池中液渣流动速度的分布

Fig.3 Velocity distribution of flux in flux pool during a oscillation circle

表 2 渣池中液渣流速的分布  
Table 2 Velocity distribution of flux in flux pool

时间周期 (t)	弯月面区域		
	结晶器壁附近	缝隙入口处	其余区域
0	向下速度最大 最大速度值 0.077/(m·s <sup>-1</sup> )	产生顺时针漩涡 根部液渣向下流动 速度较大	速度较小
1/4	速度为 0	速度较小	速度很小
1/2	向上速度最大	产生逆时针漩涡	速度较小
3/4	速度为 0	速度较小	速度很小

流动,一股返回,只有很少的渣进入缝隙。

(2) 由表 2 可得: $t=0$  时刻,是一个振动周期中保护渣流入量最大时刻。这个时期保护渣的流入对保护渣的耗量影响最大。

### 3 渣-钢界面受力分析

根据渣-钢界面的受力情况,可将界面分为 4 个特征段:结晶器弯月面根部、前半弧段、后半弧段和水平段。这 4 个特征段在一个振动周期中的受力情况见表 3。由表 3 可知,(1) 受力与流场分布相对应,当液渣向渣-钢界面流动时,它对界面形成正压;当液渣背离界面运动时,则对界面产生负压。(2) 分析流场与受力是基于界面不偏移的假设,但是由于液渣对渣-钢界面的受力有正、负压变化,因此渣-钢界面会在平衡位置发生适当的偏移,以达到新平衡,这就形成了振痕。由此可以得到,在有保护渣的情况下,渣池中液渣压力对振痕的形成影响很大。由表 3 在  $t=0$  时,产生较大的负压,而负压会产生把凝固坯壳拉回结晶器壁的作用力,减小保护渣通道,不利于保护渣的流入,又由于此时是保护渣流入量最大的时期,因此为了增大保护渣流入量,应该尽量减小此时产生的负压。

### 4 结晶器振动频率对弯月面的影响

分别选取了 3 个频率:150, 168, 179 次/min,假定保护渣的理化性能不变,然后采用上述数学模型对弯月面进行计算,得到在  $t=0$  时 3 个频率下弯月面根部所受的压力,当  $t=0$  时,也就是在

表 3 一个振动周期内渣-钢界面受力的变化  
Table 3 Variation of pressure at flux-steel meniscus during a oscillation circle

时间周期 (t)	渣-钢界面			
	弯月面根部	前半弧段	后半弧段	水平段
0	呈负压,值较大	负压	正压	正压
1/4	呈负压,值较小	负压	正压	正压
1/2	呈正压,值最大	正压	负压	负压
3/4	呈正压,值较小	正压	负压	负压

一个振动周期中保护渣流入量最大时,随着结晶器振动频率的增加,保护渣对弯月面根部的负压力增大,将会抑制保护渣向下流入,不利于润滑。同时计算在  $t=0$  时 3 个频率下结晶器壁受到保护渣的摩擦力(表 4)。

表 4 不同结晶器振动频率下结晶器壁所受到的摩擦力  
Table 4 Frictional force on mold wall at different oscillation frequency of mold

频率(f)/(次·min <sup>-1</sup> )	摩擦力/N
150	92.13
168	106.68
179	115.68

由表 4 可见,频率越高,结晶器壁所受的压力越大,因此结晶器所受到的摩擦力越大,根据力的相互作用性,保护渣所受到的结晶器的摩擦力也就越大,所以保护渣向下流入的阻力肯定就增大,保护渣耗量就减小,不利于结晶器的润滑。在南钢电炉厂进行工业性试验得出,随着振动频率的降低,铸坯表面趋于平整,振痕由弯曲的凸折叠状振痕,向平的直形凹形振痕发展,消除了钩形振痕的形成,表面质量明显好转<sup>[6]</sup>。从而得出针对南钢电炉厂的合理振动参数<sup>[6]</sup>。

### 5 结论

(1) 对于一个振动周期,在  $t=0$  时保护渣流入量最大,是影响保护渣流入的主要因素。

(2) 应结合实际情况,优化结晶器振动参数,选取合适的结晶器振动频率及其它振动参数,使振痕深度合适、结晶器润滑情况良好,改善连铸坯表面质量。

重庆大学研究生创新实践基地创新基金资助项目(200504Y1A0060112)。

#### 参考文献

- 1 Takeuchi E, Brimacombe J K. 连铸坯振痕的形成. 铸钢用保护渣译文集. 1986: 106
- 2 Shuji, Takeuchi. Steelmaking Conference Proceedings. 1991: 73
- 3 Bikerman J J. Physical Surface. London: Academic Press, 1970: 286
- 4 颜慧成, 张泊汀, 朱果灵. 连铸结晶器弯月面处流动行为研究. 中国稀土学报, 1998, 12(16): 820
- 5 Butke F, Chorm A J. Turbulence Calculation in Magnetization Variables. Appl. Num. Math. 1993, 18(12): 47
- 6 漆鑫, 唐萍, 文光华. 结晶器振动参数对连铸坯表面质量的影响. 特殊钢, 2004, 25(5): 34

漆鑫(1979-),男,博士研究生,连铸坯表面质量和结晶器保护渣研究。

收稿日期:2006-02-27