F 数计算及其与板坯连铸结晶器内钢水卷渣的关系

陆巧彤 王新华 于会香 张炯明 王万军

北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083

摘 要为了控制板坯连铸结晶器内钢水的卷渣,提出一种用结晶器流场数值模拟计算结果对前人研究出的液面波动指数 F数进行计算的方法,研究了 F数与液面波动及板坯浇注工艺参数的关系.研究表明:从结晶器流场的数值模拟计算结果中 调用相应的计算 F数所需的参数,可以方便地计算出 F数.调整浇注工艺参数将 F 数控制在 3~5 就可以将液面波动控制在 ±(3~5) mm 的合理范围内,从而减小或避免结晶器内的卷渣.

关键词 板坯连铸;结晶器;F数;卷渣

分类号 TF 777.1

随着纯净钢冶炼技术的提高,钢中杂质元素含量已能降至很低,而连铸结晶器保护渣卷入钢液被 坯壳捕捉造成的表面缺陷就成为影响冷轧钢板表面 质量的重要因素.因此,找到一种便捷的方法—— 仅通过改变连铸工艺参数就能控制板坯连铸结晶器 内钢水的卷渣——是十分必要的,对纯净钢生产更 是具有重要意义.

对结晶器内流场的研究国内外学者大多集中在 用水模拟钢液在结晶器内的流动特征及流场的影响 因素^[1-6];前人的研究虽然有的将自由表面的波幅 与工艺参数联系起来给出计算式^[7],有的给出了自 由表面波动处于稳定时水口出口速度的表达式^[8], 但这些指标或表达式计算起来比较困难,并且没有 将其与实际生产中铸坯的缺陷率联系起来,不能直 接应用在生产实践中.在该方向的研究中,日本 NKK 公司定义了反应结晶器内钢水表面波动的指 数----F数^[9],并可以通过控制 F数的取值范围来 控制结晶器卷渣;欲得到 F 数,必须首先得到钢水 流到达结晶器窄边处的碰撞速度 Ve、碰撞角度 θ和 碰撞处钢水深度 D, 而获得这些参数目前尚无较简 便的方法.因此,在生产高表面质量要求的纯净钢 时,找到一种适合实际生产的计算 F 数的新方法, 并且通过控制 F 数的取值范围来控制结晶器卷渣 以提高铸坯表面质量具有重要意义.

本文结合某钢厂板坯连铸现场生产实际情况, 运用大型商业软件 CFX5.7.1 对板坯结晶器内钢液 流场进行了模拟,将模拟结果运用到 F 数的计算

基金项目: 国家经贸委资助项目

中,探讨了计算 F 数的新方法.研究了各工艺参数 与 F 数之间的关系,从而达到通过控制 F 数的取值 范围来控制板坯连铸结晶器内钢水卷渣的目的.

1 F 数概述

手鸣俊雄等^[5]采用1:3的水模型研究结晶器液 面波动、表面流速等对结晶器卷渣的影响,提出采用 F数来评价结晶器钢水卷渣情况.F数的计算公式 如下:

$$F = \frac{\rho Q_{\rm L} V_{\rm e} (1 - \sin \theta)}{4 D} \tag{1}$$

所需参数的计算公式为:

Ŷ

$$= (a_1 + b_1 \alpha + c_1 S + d_1 \alpha S) G_1 x^2 -$$

$$(a_2+b_2\alpha+c_2S+d_2\alpha S)G_2x$$
 (2)

$$G_{i} = \exp\left[-\zeta_{i} Q_{L}^{\varsigma_{i}} Q_{g}^{\varsigma_{i}} S^{\varsigma_{i}} (90-\alpha)^{\varsigma_{i}}\right]$$
(3)

 $V_{\rm e} = A W^l Q_{\rm L}^m d^P (1/\cos\alpha)^n \exp(BQ_{\rm g}) \qquad (4)$

式中 ρ 为钢水的密度, kg •m⁻³; Q_L 为钢水的流量, m³ •s⁻¹; V_e 为钢水撞击结晶器窄边的速度, m •s⁻¹; θ 为钢水撞击结晶器窄边的角度, °; D 为撞击点与 自由面之间的距离, m; α 为浸入式水口出口角度, °; x 、y 为以浸入式水口出口中心为原点的水平和垂 直距离(用以标识水口出流的轨迹), m; S 为水口出 口平均面积, m²; Q_g 为水口吹氩流量体积速率, m³ •s⁻¹; W 为结晶器宽度, mm; d 为水口直径, m; A, B, l, m, n, p, a_i , b_i , c_i , d_i , ξ_i , ξ_i^1 , ξ_i^2 , ξ_i^3 , ξ_i^4 (i=1,2)是由浸入式水口决定的计算系数.

式中各符号的物理意义如图 1 所示.研究表明, F 数在3~5时^[10],结晶器钢水卷渣最不容易发生,铸坯及冷轧板的表面缺陷最小.

收稿日期: 2006-03-18 修回日期: 2006-07-11

作者简介:陆巧形(1971-),女,工程师,博士研究生;王新华(1951-),男,教授,博士生导师



图 1 F 数的定义 Fig. 1 Definition of F value

2 数学模型

2.1 基本假设

(1)结晶器内钢液流动是稳态粘性不可压缩流动;

- (2) 不考虑结晶器振动及锥度等因素的影响;
- (3) 计算边界为无滑移边界;
- (4) 不计结晶器弯月面的表面波动;
- (5) 忽略传热对流动的影响.

2.2 控制方程

(1) 连续方程.

$$\frac{\partial(\rho_{u_j})}{\partial_{x_j}} = 0 \tag{5}$$

(2) 动量方程.

$$\rho \frac{\partial (\underline{u}_{i}\underline{u}_{j})}{\partial x_{j}} = -\frac{\partial p}{\partial x_{i}} + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(\mu_{e} \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} \right) + \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left(\mu_{e} \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{i}} \right) + \rho_{g_{i}} \quad (6)$$

(3) к- ε 方程.

湍动能方程:

$$\rho \frac{\partial (u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_e + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (7)$$

湍动能耗散方程:

$$\rho \frac{\partial (u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_e + \frac{\mu_i}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + c_1 \frac{\varepsilon}{k} G - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \rho$$

(8)

$$G = \mu_{t} \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} \left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{j}} \right)$$
(9)

$$\mu_{\rm e} = \mu + \mu_{\rm t} = \mu + \rho_{c\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{10}$$

式中, $u_i(=1,2,3)$ 分别为三坐标轴 x, y, z方向上的速度(u_x, u_y, u_z), ρ 为流体密度, p为压力, k为 湍动能, g_j 为重力加速度分量, ε 为湍动能耗散率, G为湍动能产生项, $\mu_e, \mu \mu \mu_t$ 分别为有效、层流和 湍流黏度系数.上述方程中所出现的系数按 Launder 和 Spalding^[11]所推荐的数据,取 $c_{\mu}=0.09$, $c_1=1.43$, $c_2=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_{\epsilon}=1.3$.

2.3 边界条件

(1)入口设在水口的入口处,其速度值根据入口与出口的质量守恒计算得出,即:入口面积与入口速度之积等于出口面积与拉速之积.

(2) 出口设在结晶器下方的出口处,采用质量 边界条件,即出口处与入口处质量守恒.

(3)结晶器液面设为自由滑移的壁面.

(4) 水口壁及结晶器壁采用无滑移边界条件, 即黏度设为无穷大,壁面附近由壁面函数确定,

(5) 对称面:为节省计算时间,考虑到结晶器及 水口形状的对称性,取实际结晶器的一半作为计算 域.取垂直结晶器宽边的中心面作为对称面,在对 称面处各变量法向分量为零.

2.4 计算方法

采用英国 ATE 公司的 CFX 5.7.1 软件, 对上 述模型进行了三维模拟计算.

2.5 模拟条件

模拟计算所用到的工艺参数见表 1.

表 1 工艺参数表 Table 1 Operation parameters

序 号	模型厚 度/m	模型宽 度/m	拉速/ (m •min ⁻¹)	水口浸入 深度/mm	水口出口 角度/(°)
1	0.25	1.1	1.4	120	-15
2	0.25	1.9	1.4	120	-15
3	0.25	1.5	1.0	120	-15
4	0.25	1.5	1.2	120	-15
5	0.25	1.5	1.4	120	-15
6	0.25	1.5	1.6	120	-15
7	0.25	1.5	1.4	120	-25
8	0.25	1.5	1.4	120	-34
9	0.25	1.5	1.4	200	-15
10	0.25	1.5	1.4	250	-15

注:水口出口角度前面的负号表示向下的出口角度.

3 结果与讨论

3.1 数值模拟计算结果

数值模拟计算是在 Pentium (R) 4, CPU 3.00 GHz, 1 GB 内存的计算机上进行的,收敛精度为 10^{-4} .图 2 为结晶器宽度 1500 mm、水口出口角度向下 15° 、水口浸入深度 120 mm 和拉速 1.4 m •min⁻¹条件下,数值模拟计算得到的结晶器流场形态图.



图 2 水口及结晶器流场

Fig. 2 Calculated flow field of steel in the nozzle and model

3.2 F 数的计算

利用对板坯结晶器流场的三维数值模拟结果, 可以得到计算 F 数所需的相应数据.具体方法 如下.

(1) 撞击点的确定.用 CFX 软件的后处理程序,在结晶器流场计算结果中取结晶器窄面纵向中 心线上 z 向剪切力等于零的点为钢液流股与结晶 器窄面的撞击点.

(2) 撞击点与自由面之间的距离 D. 根据确定 的撞击点坐标,即可计算出其与自由面之间的距 离 D. (³)钢水撞击结晶器窄边的速度 V_e·根据确定的撞击点即可通过 CFX 的后处理程序从数值模拟计算结果中调出钢水在撞击点的碰撞速度 V_e·

(4) 撞击角度 θ.

$$\theta =_{\arctan \frac{D-H}{W/2}} \tag{11}$$

式中, H 为水口浸入深度, 即水口出口中心线到自由面的距离, m.

(5)钢水流量 QL·

$$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{L}} = \boldsymbol{W} \boldsymbol{T} \boldsymbol{V}_0 / 60 \tag{12}$$

式中, T 为结晶器厚度, m; V_0 为拉速, m • min⁻¹.

将用上述方法得到的各工况下计算 *F* 数所需的数据分别代入式(1),并取钢液密度 ρ 为 $7020 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,即可计算出各工况下的 *F* 数.

这种 F 数的计算方法省去了用水模型来确定 一系列的由水口确定的计算参数,不但减少了实验 过程中不确定因素对计算结果的影响,而且扩大了 计算 F 数的适用范围,克服了前人研究中获得的计 算参数无法完全应用于其他情况的弊端.

3.3 F 数与液面波动的关系

钢液面的波动幅度通常被用作判断结晶器内钢 水是否会将保护渣卷入的条件.本文借用相应水模 型实验的结果对 F 数与液面波动的关系进行分析. 水模型实验是在1:1的模型上进行的,以距结晶器 窄面 50 mm 和 350 mm 处的表征钢液面波动的平均 波高为标准进行研究.

图 3 为距结晶器窄面 50 mm 和 350 mm 处的平 均波高与 F 数的关系图.可以看出:随着表征水口 出流流股传递给钢液面的动量—— F 数的增加,钢 液面的波动加剧,即随着 F 数的增加,钢液卷入保 护渣的趋势增加.由图 3 还可以看出:当 F 数在 3~5的范围内变化时,板坯结晶器内钢液的平均波 高在3~8 mm 之间,即液面波动范围在±(3~



图 3 平均波高与 F 数的关系 Fig. 3 Relationship between level fluctuation and F value

5) mm的范围内,故在实际生产中,只要将 F 数控制 在 3~5 就可以将液面波动控制在合理的范围内,卷 渣的几率最小.这一结论与前人研究的 F 数在3~ 5 时^[10],铸坯及冷轧板的表面缺陷最小的结论完全 一致.

由此可见:钢液自由表面的波动与由浇注工艺 参数计算得出的 F 数有很强的相关性,通过选择适 当的浇注工艺参数来控制 F 数的大小即可控制钢 液面的波动幅度以减少或避免结晶器内的卷渣.

3.4 结晶器宽度与 F 数的关系

图 4 为拉速 $1.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 、水口浸入深度 120 mm和水口出口角度向下 15° 时,不同结晶器宽 度条件下计算得到的 F 数.可以看到,当结晶器宽 度由 1100 mm 增加至 1500 mm 时, F 数随宽度增加 由 4.07 增至 5.24;当宽度由 1500 mm 增加至 1900 mm时,计算得到的 F 数基本相同.从总体上 看,F 数是随结晶器宽度的增加而增加,但当宽度 达到一定值(如 1500 mm)后,宽度再增加其对 F 数 变化的影响将减小.



图 4 结晶器宽度与 F 数的关系

Fig. 4 Relationship between mold width and F value

3.5 拉速对 F 数的影响

图 5 为结晶器宽度 1 500 mm、水口浸入深度 120 mm 和水口出口夹角向下 15°时,不同拉速条件 下计算得到的 F 数.可以看到: F 数随拉速的增加





而增大,且拉速大于 $1.2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 后,拉速每增加 $0.2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, F数增加 1 左 f. F数的增加表明卷 渣的倾向增加,即随拉速的增加,结晶器内钢液卷渣 的倾向增大.

3.6 水口浸入深度对 F 数的影响

图 6 为结晶器宽度 1 500 mm、拉速 1.4 m •min⁻¹和水口出口夹角向下 15°时,不同水口浸入 深度条件下计算得到的 F 数.可以看到:F 数随水 口浸入深度的增加而减小.F 数减小表明卷渣倾向 降低,即增加水口浸入深度将减小结晶器内的液面 波动、降低钢液卷渣的倾向.



图 6 水口浸入深度与 F 数的关系 Fig. 6 Relationship between submerged depth and F value

3.7 水口出口角度对 F 数的影响

图 7 为结晶器宽度 1 500 mm、拉速 1.4 m •min⁻¹和水口浸入深度 120 mm,不同水口出口角度条件下计算得到的 F 数·由图可见:F 数随着水口出口角度向下的增大而减小·水口出口倾角每向下增大 10°, F 数减少 1 左右·故加大水口出口向下的倾角将降低由液面波动引起的卷渣危险.





3.8 防止卷渣的措施

由上述分析可以看出: F 数不但能从总体上反应结晶器内液面的波动情况,而且其与各板坯连铸工艺参数有很好的对应关系;因此只要调整 F 数的

大小,使之在^{3~5}之间取值,就可以有效地将结晶 器内钢液面的波动控制在合理的范围内,从而有效 地减小和避免卷渣.F数的值是通过调整各工艺参 数的取值来控制的,故F数就像一座桥梁,通过它 即可很方便地将连铸工艺参数的选择与控制结晶器 内钢液卷渣联系起来.

4 结论

(1)采用数值模拟方法先计算出结晶器内钢液的流场,然后从计算结果中调用相应的计算 F 数所需的参数,即可很方便地计算出液面波动指数—— F 数.

(2) 将 F 数控制在 3~5 即可以将液面波动控制在±(3~5) mm 的合理范围内,卷渣的几率 最小.

(3) 增大结晶器宽度、增加拉速、减少浸入式水口浸入深度和减小水口出口向下倾角均会使 F 数增加,即增大结晶器内卷渣的倾向.

(4) 调整各工艺参数使 F 数控制在 3~5 的范围内就可以减小或避免结晶器内的卷渣。

- 参考文献
- [1] 万晓光,韩传基,蔡开科.连铸板坯结晶器浸入式水口试验研究.钢铁,2000,35(9):20

- [2] Thomas B G, Mika L J, Najjar F M. Simulation of fluid flow inside a continuous slab-casting machine. Metall Mater Trans B, 1990, 21B: 387
- [3] 陈永范,陈德杰,李权.大板坯连铸结晶器内流场实验研究. 炼钢,1998(2):25
- [4] Gupta D. Lahiri A K. A water model study of the flow asymmetry inside a continuous slab casting mold. Metall Mater Trans B, 1996, 27B: 757
- [5] Audrzejewski P, Köhler K U, Pluschkell W. Model investigations on the fluid flow in continuous casting moulds of wide dimensions. Steel Res, 1992 (6); 242
- [6] Najjar F M, Thomas B G, Hershey D E. Numerical study of steady turbulent flow through bifurcated nozzles in continuous casting. Metall Mater Trans B, 1995, 26B: 749
- [7] Gupta D. Lahiri A K. Water-modeling study of the surface disturbances in continuous slab caster. Metall Mater Trans B, 1994, 25B: 227
- [8] Panaras G A. Theodorakakos A. Bergeles G. Numerical investigation of the free surface in a continuous steel casting mold model. Metall Mater Trans B, 1998, 29B: 1117
- [9] Teshima T, Kubota J, Suzuki M, et al. Influence of casting conditions on molten steel flow in continuous casting mold at high speed casting of slabs (in Japan). Iron Steel, 1993, 79(5): 576
- [10] Teshims T, Osame M, Okimoto K, et al. Improvement of surface property of steel at high casting speed//Steelmaking Conference Proceedings. Warrendale: Iron and Steel Society, 1988;111
- [11] Launder B E, Spalding D B. The numerical computations of turbulent flows. Comput Method Appl Mech Eng, 1973(3): 269

Calculation of F value and relationship between F value and slag entrapment in a slab continuous casting mold

LU Qiaotong, WANG Xinhua, YU Huixiang, ZHANG Jiongming, WANG Wanjun

Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT To control slag entrapment, a new method was put forward to calculate the level fluctuation index, i.e. F value, which was defined by other researchers. F value could easily be calculated based on the results of numerical simulation of slab continuous casting mold flow. The relationship between F value and level fluctuation in the mold as well as operational technological parameters were also studied. It is shown that using the data of numerical simulation of slab continuous casting mold flow can easily calculate F value. By adjusting operational technological parameters, the range of F value can be controlled in 3-5, and the surface fluctuation in $\pm(3-5)$ mm, as a result, slag entrapment can be avoided.

KEY WORDS slab continuous casting; mold; *F* value; mold powder entrapment