

立式板坯连铸机结晶器内流场的数值物理模拟

赵志刚^{1,2} 施哲¹ 胡坤太² 陈远清² 仇圣桃²

(1 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 昆明 650093; 2 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081)

摘要 采用1:1的水模型研究了200 mm × 1 300 mm立式板坯连铸结晶器内流场和在水口浸入深度115 mm、拉坯速度0.55 m/min时水口结构参数(侧孔尺寸40 mm × 40 mm ~ 40 mm × 80 mm, 侧孔角度+15° ~ -15°)对液面波动的影响, 基于流体力学计算, 利用Fluent软件和采用k-ε双方程高雷诺数湍流模型对板坯结晶器内的流场进行了三维数值模拟。结果表明, 数值模拟结果与物理模拟结果较吻合; 水口结构参数对液面湍动能的影响较明显; 在1# ~ 4#水口中, 2#水口(40 mm × 40 mm, +15°, 向下, 倒Y形底部)的使用性能相对较好; 流股的冲击速度越浅, 自由液面湍动能越大。

关键词 连铸机 结晶器 液面湍动能 浸入式水口 物理模拟

Numerical and Physical Simulation on Fluid Flow Field in Mold of Vertical Slab Caster

Zhao Zhigang^{1,2}, Shi Zhe¹, Hu Kuntai², Chen Yuanqing² and Qiu Shengtao²

(1 College of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 2 National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology, Center Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The liquid flow field in mold of a 200 mm × 1 300 mm vertical slab caster and the effect of nozzle structure parameters (side hole size 40 mm × 40 mm ~ 40 mm × 80 mm, side hole angle +15° ~ -15°) with depth of submerged entry nozzle 115 mm and casting speed 0.55 m/min on mold level fluctuation have been studied by using 1:1 water mold, and based on calculation of fluid mechanics, the 3-dimensional numerical simulation of flow field in slab mold is carried out by using Fluent software and k-ε high Re equation turbulence model. Results show that the numerical simulation results coincide with the results of physical simulation; the effect of nozzle structure parameters on liquid level turbulent kinetic energy is obvious; in No1 ~ No4 nozzles, the service performance of No2 nozzle (40 mm × 40 mm, +15°, down ward, bottom with inverted Y shape) is relative better; and the shallower the strand impact depth, the larger free surface turbulent kinetic energy.

Material Index Caster, Mold, Free Surface Turbulent Kinetic Energy, Submerged Nozzle, Physical Simulation

1 研究方法

宝钢特殊钢分公司2008年投产的用于浇铸特殊钢及特种合金的立式板坯连铸机, 其浇铸断面尺寸为200 mm × 1 300 mm, 中间包钢水容量为17 t, 结晶器长度为900 mm。

1.1 水模型建立

基于相似原理^[1], 建立板坯连铸结晶器1:1物理模型。钢液在结晶器内运动时受到了重力、惯性力、粘性力和表面张力的作用, 包含这些力的相似准数有: 弗鲁德准数(Fr)、雷诺准数(Re)和韦伯准数(We)。这里采用近似模拟方法, 基于低拉速的特点, 主要考虑惯性、重力和粘性力的作用。

1.2 数学模型建立

(1) 对模型(图1)的基本假设: ①传输过程为

稳态, 钢液为不可压缩粘性流体; ②钢液的热物理参数与常数; ③忽略凝固过程中钢的密度变化; ④铸坯外弧和内弧的传热条件对称; ⑤不考虑机械变形引起的流动和铸坯凝固收缩引起的流动。

(2) 钢液流动的控制方程可表示为^[2]:

①质量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

②动量方程:

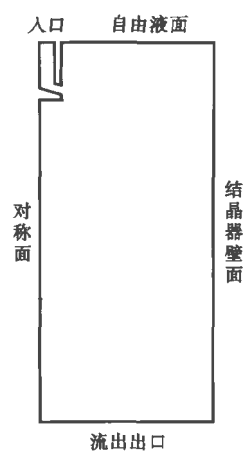


图1 模型几何结构
Fig. 1 Geometry structure of model

$$\rho \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_e \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i$$

③湍动能方程:

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

④湍动能耗散方程:

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

$$G_k = \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right); \mu_e = \mu + \mu_t = \mu + \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

式中: $u_i (i = 1, 2, 3)$ - 分别为三坐标轴 x, y, z 方向上的速度 (u_x, u_y, u_z); P - 压力; k - 湍动能; ε - 湍动能耗散率; ρ - 密度; μ, μ_t - 层流和湍流粘度系数; μ_e - 有效粘度系数; G_k - 湍动能能量产生率。

积分系数采用 Launder 和 Spalding 的推荐值, $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.30$ 。

1.3 边界条件

由于结晶器的双对称性,采用1/4结晶器模型进行计算。边界条件为:(1)取钢种的浇铸温度 T_0 , 等于钢水的液相线温度 (T_l) 与过热度 (ΔT) 之和, 即 $T_0 = T_l + \Delta T$; (2) 在自由液面, 除垂直于表面的速度设为 0 外, 所有变量的法向梯度都设为 0; (3) 对称面上, 除垂直于对称面的速度分量为 0 外, 所有别的变量的法向梯度都设为 0; (4) 出口设为流出口; (5) 垂直于壁面的速度分量设为 0, 平行于壁面的分量采用移动边界, 凝固坯壳的向下移动速度等于拉速, 水口壁面按绝热处理, 冷却壁面用现场给定的换热系数。

1.4 计算参数和收敛标准

根据模型可得到数值模拟参数如表 1 所示, 4 种水口的结构参数如表 2 所示。收敛标准: 监控点各变量的值及最大值保持稳定; 无量纲化残差应小于 10^{-3} , 进出口的流量、焓值的误差均在 10^{-4} 以下。

2 计算结果及分析

2.1 SEN 结构对液面湍动能的影响

在拉速相同, 水口的浸入深度相同的条件下, 在自由液面上取结晶器中心到窄边中心一条直线, 并获取该直线上 4 种不同水口自由表面湍动能的分布情况,

表 1 数值模拟参数

Table 1 Parameters for numerical simulation

项目	参数
钢种	2205
结晶器断面尺寸/(mm × mm)	200 × 1 300
水口浸入深度/mm	115
拉坯速度/(m · min ⁻¹)	0.55
钢液层流粘度/(Pa · s)	0.006 2
过热温度/℃	30
熔化潜热/(J · kg ⁻¹)	1.55 × 10 ⁵
上渣面换热系数/(W · m ⁻² · K ⁻¹)	10
液相线温度/K	1 757

表 2 水口结构参数

Table 2 Parameters of submerged entry nozzles

水口 No	侧孔面积(宽 × 高)/(mm × mm)	侧孔角度/°	底部形状
1	40 × 80	+15(向下)	倒 Y
2	40 × 40	+15(向下)	倒 Y
3	40 × 80	-15(向上)	Y
4	40 × 40	-15(向上)	Y

如图 2(a) 所示。通过物理模拟所得的各水口液面平均波动(水口浸入深度 115 mm, 拉速 0.55 m/min) 情况如图 2(b) 所示。

从图 2(a) 可见, 侧孔倾角向上的 4# 水口自由液面湍动能较侧孔倾角向下的 1#、2# 水口大。这是由于出水口倾角向上, 流股向自由液面冲击, 冲击深度较浅, 所以对液面的扰动较大, 自由液面湍动能较大。与其他曲线对比 4# 水口自由液面湍动能分布曲线存在两个较大的波峰, 这是因为 4# 水口倾角向上、侧孔面积小, 流股流出后直接冲向自由液面造成第 1 个湍动能波峰, 流股冲击自由液面后少部分流股向水口方向流动, 大部分流股流向窄边, 与窄边撞击后在窄边附近形成一个较小的回旋区, 对窄边附近自由液面的扰动较剧烈即形成第 2 个湍动能波峰。对于 3# 水口, 由于侧孔面积较 4# 水口大, 则在相同的拉速下其流股所携带的动能较 4# 水口流股

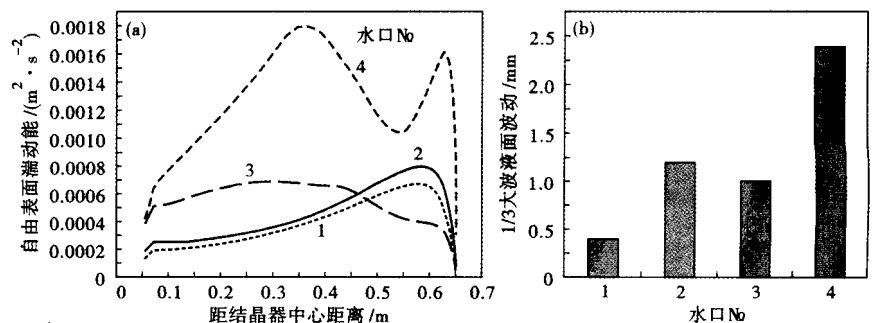


图 2 (a) 水口结构对结晶器表面湍动能的影响; (b) 各水口的平均液面波动量
Fig. 2 (a) Effect of nozzle structure on mold free surface turbulent kinetic energy; (b) Average level fluctuation of each nozzle

小,该流股冲击液面后动能耗散,所以在窄边附近没有形成湍动能波峰。

对于侧孔倾角向下的水口,侧孔面积较小的 2[#]水口在窄边附近形成的湍动能波峰较侧孔面积较大的 1[#]水口大。这是因为在相同的流量下侧孔面积越小则其所携带的动能越大,对窄边的冲击程度越强,造成的上部回旋区所携带的能量就越大,对液面的扰动越强,所以自由液面湍动能就越大。

2.2 SEN 的结构对流场流线分布的影响

结晶器内流线分布图,如图 3 所示。同时做出结晶器物理模拟的流场分布情况如图 4 所示(水口浸入深度 115 mm,拉速 0.55 m/min)。

从图 3 和图 4 可见,由浸入式水口侧孔流出的钢水射流,由于对周边钢水具有卷吸作用,再加上凝固坯壳对其在空间上的限制,在结晶器内形成多个回流区。射流在冲击结晶器窄边后分成上下两个方向相反的流股,形成上下两大主回流区。上部回流

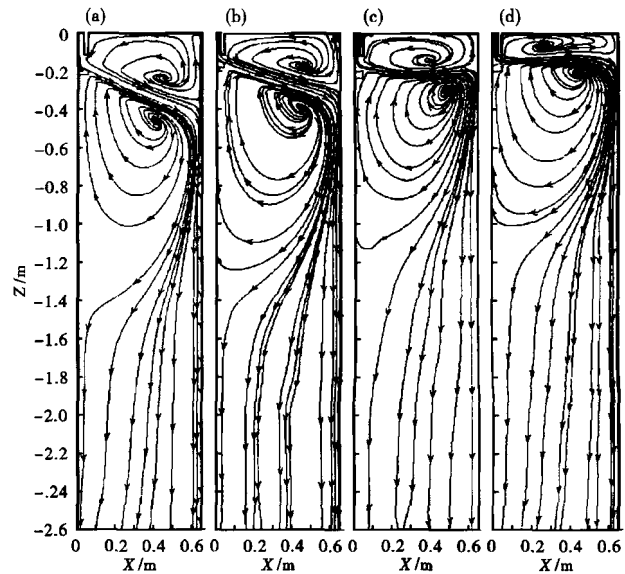


图 3 水口结构对结晶器流线分布的影响:水口 No1 (a); No2 (b); No3 (c); No4 (d)

Fig. 3 Effect of nozzle structure on distribution of flow line in mold: nozzle No1 (a), No2 (b), No3 (c) and No4 (d)

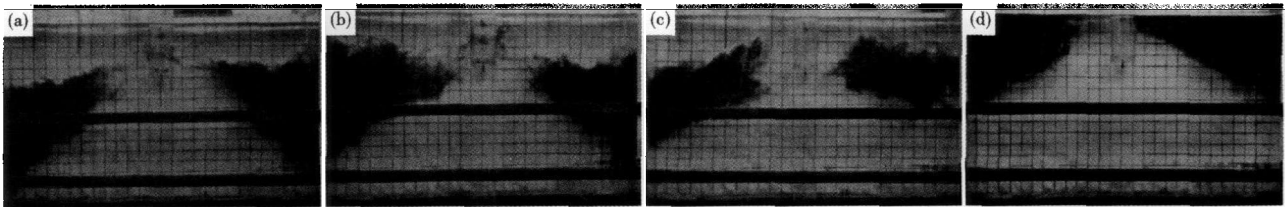


图 4 水模型 2 s 时各水口的墨水扩散情况:水口 No1 (a); No2 (b); No3 (c); No4 (d)

Fig. 4 Diffusion condition of ink in water model with each nozzle at 2 s, nozzle No1 (a), No2 (b), No3 (c) and No4 (d)

区的形成及其大小受到弯月面、结晶器宽面与窄面的共同限制,且其速度大小对结晶器液面的波动、温度分布和湍动能分布具有直接的影响。

各水口的冲击深度从大到小的顺序是 1[#] > 2[#] > 3[#] > 4[#] 水口,而自由液面湍动能从大到小的顺序是 4[#] > 3[#] > 2[#] > 1[#] 水口,可见自由液面湍动能与流股的冲击深度成反比。因冲击深度浅则流股撞击窄边的位置距自由液面较近,形成的上部回旋区对自由液面的扰动较强,导致自由液面湍动能越大。

对比 4 个水口的充满度可见,侧孔面积较大的 1[#]、3[#]较侧孔面积较小的 2[#]、4[#]水口差,且 1[#]、3[#]水口侧孔上部的倒吸现象比 2[#]、4[#]水口严重,会在水口附近的自由液面处形成漩涡。由于 4[#]水口自由液面湍动能较大,导致液面波动幅度较大,可能存在卷渣情况。可见 2[#]水口较适合该工况的浇铸。

3 结论

(1) 数值模拟结果与物理模拟结果较吻合。

(2) 侧孔倾角相同,侧孔面积由 40 mm × 80 mm 变成 40 mm × 40 mm,液面湍动能增加。

(3) 在 1[#] ~ 4[#]水口中,2[#]水口的使用性能较好。

(4) 冲击速度越浅则自由液面湍动能越大。

(5) 相同流量下,大侧孔面积的充满度较小侧孔面积要差。

科技部科研院所技术开发研究专项资金项目(编号:NCSTE-2006-JK-ZX-030)

参考文献

- 赵志刚,胡坤太,陈远清. 立式板坯连铸机结晶器内液面波动的物理模拟. 特殊钢, 2011, 32(3): 12
- 干勇,仇圣桃,萧泽强. 连续铸钢过程数学物理模拟. 北京:冶金工业出版社, 2001

赵志刚(1985-),男,硕士研究生,2009年昆明理工大学毕业,连铸技术仿真模拟。

收稿日期:2011-09-18