

304 不锈钢板坯连铸结晶器水口结构优化的数值模拟

邓南阳^{1,2} 金友林²

(1 安徽工业大学冶金与资源学院, 马鞍山 243002; 2 马鞍山钢铁股份有限公司技术中心, 马鞍山 243000)

摘要 通过数值模拟研究了 304 不锈钢 200 mm × 1 550 mm 板坯结晶器内用原水口时的钢液流场及钢-渣界面的特征。结果表明,原水口的结晶器流场的上回流过强,钢-渣界面的不稳定,结晶器窄边渣液层薄,易发生卷渣和钢液裸露;最优化水口结构为将原水口 V 型底部改成凹型,增加水口出口形状的锥度、向上倾角 10°。

关键词 304 不锈钢 板坯 水口优化 连铸结晶器 数值模拟

Numerical Simulation on Optimization of Nozzle Structure for 304 Stainless Steel Slab Concasting Mold

Deng Nanyang^{1,2} and Jin Youlin²

(1 School of Metallurgy and Resource, Anhui University of Technology, Maanshan 243002;
2 Maanshan Iron and Steel Group Co Ltd, Maanshan 243000)

Abstract The characteristics of liquid steel-slag interfacial profile and liquid field in mold with original nozzle for 304 stainless steel 200 mm × 1 550 mm slab have been studied by numerical simulation. Results show that in mold with original nozzle the upper returning flow is too strong, led to liquid steel-slag interfacial profile unstable, thin slag layer at narrow side of mold, and easier occurring slag entrapment and liquid exposed; the optimum nozzle structure is to modify the V-type bottom of original nozzle to concave type, increase the taper of nozzle outlet with upward angle 10°.

Material Index 304 Stainless Steel, Slab, Nozzle Optimization, Casting Mold, Numerical Simulation

目前虽可成功采用连铸技术生产不锈钢,但是由于不锈钢本身的物理性能和凝固特点,在连铸过程中连铸坯表面常出现严重的表面缺陷。在生产 304 不锈钢过程中,连铸坯存在严重的凹陷、渣坑等表面缺陷,铸坯经过修磨后冷轧板表面仍然存在明显的线状缺陷^[1]。通过现场调研发现连铸结晶器内流场存在严重问题:结晶器窄边保护渣有翻腾、冒泡现象,渣面局部呈现淡蓝色火苗;液渣层厚度不均匀,距离两窄边 200 mm 处,一侧液渣层厚度为 15 ~ 20 mm,对称的另一侧厚度只有 4 ~ 5 mm,结晶器流场存在严重不合理现象。本文对原工艺参数和水口结构进行结晶器内钢液流场和钢-渣界面特征的数值模拟研究,对模拟结果显示的问题进行水口结构参数优化,从而优化结晶器流场,控制结晶器液面的不稳定性,最终改善连铸坯表面质量^[2-4]。

1 结晶器数值模拟的三维数学模型

1.1 基本假设

(1) 结晶器内钢液流动是稳态黏性不可压缩流动;(2) 不考虑结晶器振动及锥度等因素的影响;

(3) 忽略凝固传热对流动的影响;(4) 结晶器内钢液按均相介质处理,钢液上面保护渣全为液态。

1.2 控制方程

计算所用的数学模型包括描述流动行为的连续方程和动量方程。

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2)$$

式中: ρ - 流体密度; u_i 、 u_j - x_i 和 x_j 方向上的速度分量; g_i - 重力加速度分量; μ_{eff} - 有效黏度(可通过 k - ε 双方程模型及壁面函数计算求得)。

流动能(k)方程:

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍动能耗散(ε)方程:

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) \quad (4)$$

$$\text{其中, } G = \mu_r \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

式中: k -湍动能; ε -湍动能耗散率; μ_r -湍流黏度系数; C_1 、 C_2 、 σ_k 、 σ_ε -经验常数。

1.3 边界条件

(1)入口设在水口的入口处,其速度根据拉速计算得出, k 、 ε 值由(5)式确定,

$$k_{\text{inlet}} = 0.01 u_{\text{inlet}}^2, \varepsilon_{\text{inlet}} = k_{\text{inlet}}^{1.5} / (0.5 d_0) \quad (5)$$

式中: d_0 -入口的直径;钢液的体积分数在入口处设为1,渣为0。

(2)出口边界设成 Opening 边界,可进可出的无压力出口,出口钢液体积分数设为1,渣为0。

(3)水口壁和结晶器壁采用无滑移边界条件,计算域上表面为滑移边界。

(4)钢液-钢渣两相初始化,定义结晶器顶部 30 mm 截面以内为液渣,截面以下为钢液。

1.4 结晶器钢渣两相流及钢-渣界面模拟方法

模拟结晶器钢-渣界面时,采用 VOF(流体体积)方法追踪钢-渣界面,在运动界面的空间网格内定义流体体积分数,构造流体体积分数的方程,追踪界面的变化,确定钢-渣界面的位置和形状,从而构造出钢-渣界面。在 VOF 法模拟钢-渣界面过程中,两种流体共用一组传输方程,在计算的网格单元中计算流体体积分数 a_{st} ,体积分数方程表示如下:

$$\frac{\partial a_{st}}{\partial t} + \nabla \cdot a_i \vec{u} = 0 \quad (6)$$

式中: t -时间; \vec{u} -速度矢量;当 $a_{st} = 1$ 时代表钢液, $a_{st} = 0$ 时代表液渣, a_{st} 值处于 0~1 之间为钢-渣界面。

初始设定为一定高度以上为完全液渣层,以下为完全钢液区域,这一高度的钢-渣的体积分数都是 0.5,通过结晶器内传输计算,采用 VOF 法追踪钢-渣界面位置和形状,建立钢-渣界面的模型^[5,6]。

2 计算结果分析

2.1 原型水口结晶器内流场及钢-渣界面特征

图 1 是结晶器尺寸 200 mm × 1 550 mm,拉速为 1.1 m/min,水口浸入深度 150 mm(水口上沿至钢液面距离)时原水口的数值模拟结晶器内流场和钢-渣界面特征图。由图 1 可见,当 304 不锈钢板坯连铸结晶器采用向上出口倾角的双侧孔浸入式水口浇注时,出口射流稍向下倾斜直冲到窄边,撞击窄边后分

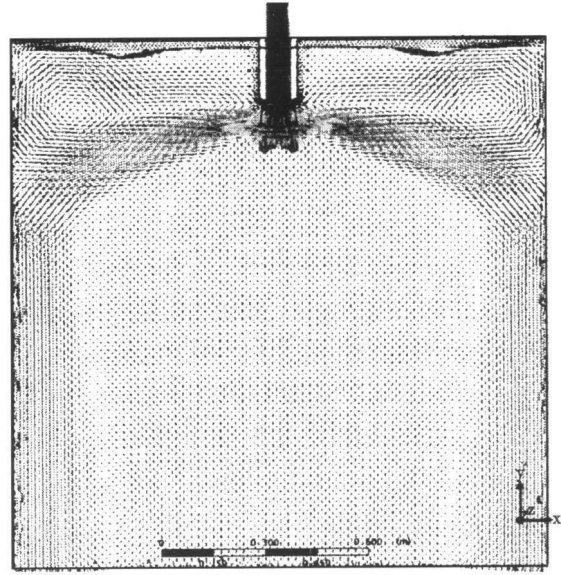


图 1 原水口的结晶器内流场和钢-渣界面特征

Fig. 1 Feature of liquid steel-slag interfacial profile and liquid field in mold with original nozzle

成向上和向下两流股,向上流股在钢-渣界面附近形成回流区(即上回流),上回流是保护渣熔化热量来源,同时也是造成卷渣的直接影响因素,其强弱取决于水口形状、出口角度、水口浸入深度和拉速等。图 1 中的上回流范围较小,对钢渣界面影响较大;向下的流股也形成与上部循环方向相反,范围较大的回流区,这对夹杂物和气泡的上浮影响较大,钢-渣界面在结晶器宽度 1/4 偏窄边处存在典型波谷特征,在波谷处容易发生剪切卷渣,波谷深度决定着发生卷渣的程度,在原水口时,结晶器内上回流过强,窄边附近的液渣层很薄,一窄边甚至出现钢液裸露。

由模拟计算结果得出,原水口产生的结晶器流场上回流过强,钢-渣界面波动大,不仅容易发生卷渣,而且在窄边容易造成钢液裸露而污染钢液,严重影响连铸坯质量。为了提高连铸坯的质量,改善结晶器内流场状况,针对 200 mm × 1 550 mm 板坯结晶器,1.1 m/min 拉速分别研究水口底部形状、出口形状以及水口倾角对结晶器内流场及钢-渣界面影响规律,从而优化水口参数。水口底部形状如图 2(a,b)所示,水口出口形状及尺寸如图 2(c,d,e)所示,由于不锈钢本身物理性能和凝固特点,一般连铸结晶器水口出口倾角都是向上,研究水口出口倾角影响规律时倾角选择为向上 15°、10°和 5°,其中原水口参数:出口形状 No1 + V 型底部 + 倾角 10°。

2.2 水口底部形状对结晶器内流场及钢-渣界面特征的影响

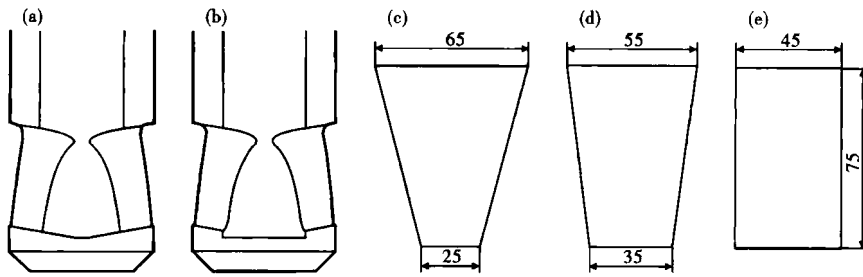


图 2 水口底部形状:(a)V型;(b)凹型和出口形状:(c)No1;(d)No2;(e)No3
Fig.2 Nozzle bottom shape: (a) V-type; (b) concave type; and nozzle side outlet shape: (c) No1; (d) No2; (e) No3

从图 3 可见,水口底部形状为凹型时,出口流股有一定程度下移,这有利于稳定结晶器钢-渣界面,减小卷渣发生几率,结晶器窄边液渣层有一定厚度,钢液没有出现裸露现象,而且冲击深度增加不多,下回流涡心也只降低 10 mm 左右。

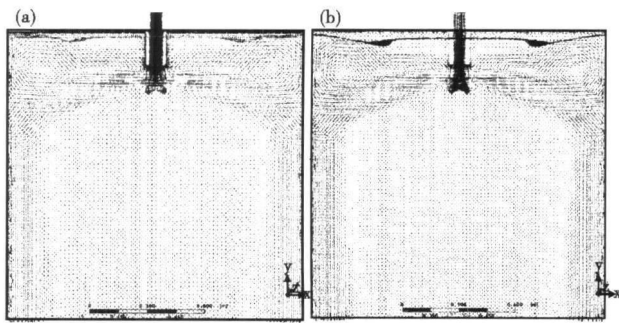


图 3 不同结晶器内流场,出口形状 No1,向上倾角 10°:(a) V型;(b)凹型
Fig.3 Flow field in mold, nozzle outlet shape No1, upward angle 10°, bottom shape of nozzle: (a) V-type; (b) concave type

结晶器窄边由于上下回流作用受到高温钢液剪切作用,窄边所受的剪切力在拉坯方向上存在两个波峰和一个波谷,分析结晶器流场可知两波峰高度分别是上下两回流涡心的高度,波谷位置为流股冲击点位置。钢液对窄边剪切应力大,严重影响了坯壳生长和铸坯表面质量,甚至由于坯壳厚度变薄影响到连铸顺行。由图 4 可见,水口底部为凹型时结晶器窄边所受钢液剪切应力相对较小,有利于窄边坯壳生长和铸坯表面质量。

2.3 水口出口形状对结晶器内流场及钢-渣界面特征的影响

从图 5 可见,不同出口形状时,结晶器内流场存在一定差异,随着出口形状的锥度减小,流股冲击深度增加,钢渣卷混严重,钢-渣界面变活跃,而且窄边液渣层厚度变薄。从图 6 不同水口出口形状时窄边

的钢液剪切应力可以看出,在水口形状 No1 时结晶器内窄边的剪切应力较小,对初生凝固坯壳生长和铸坯表面质量有利。综合分析认为,对于 200 mm × 1 550 mm 不锈钢板坯连铸结晶器倾角向上的水口采用出口形状 No1 较为合适。

2.4 水口出口倾角对结晶器内流场及钢-渣界面特征的影响

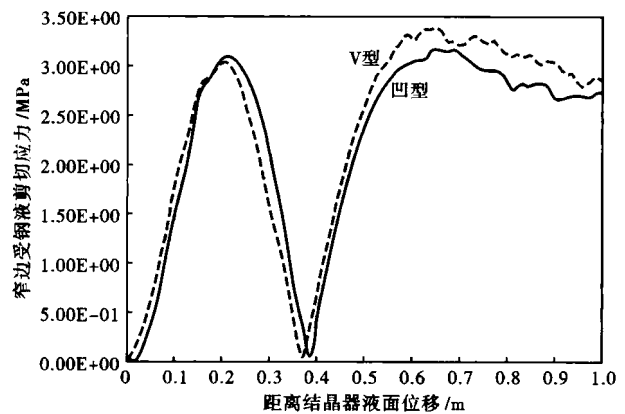


图 4 底部形状对结晶器窄边钢液剪切应力的影响
Fig.4 Effect of nozzle bottom shape on shear stress of liquid at narrow side of mold

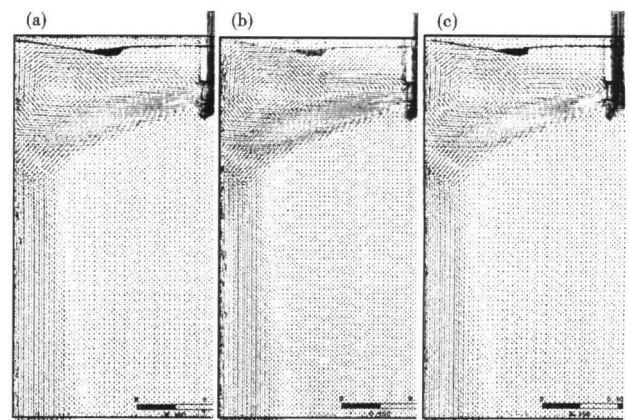


图 5 凹型底部、倾角向上 10°时水口出口形状(a- No1;b- No2;c- No3)对结晶器内流场的影响
Fig.5 Effect of nozzle outlet shape (a- No1; b- No2; c- No3) with concave type bottom and upward angle 10° on flow field in mold

图 7 是在水口出口形状 No1、凹型底部、不同出口倾角时的结晶器内流场。从图 7 可见,随着向上倾角的减少,流股冲击深度增加,但是钢-渣界面并

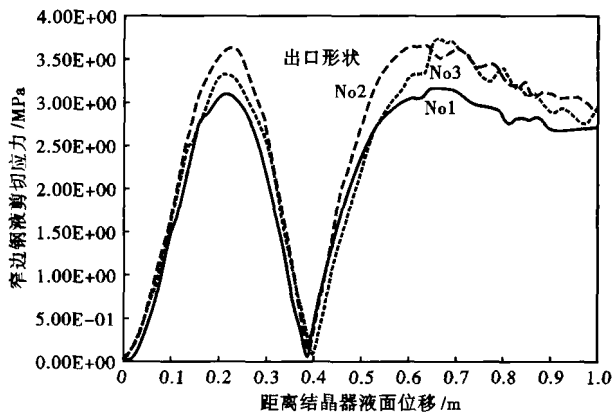


图6 水口出口形状对结晶器窄边钢液所受的剪切应力的影响

Fig. 6 Effect of nozzle outlet shape on shear stress of liquid at narrow side of mold

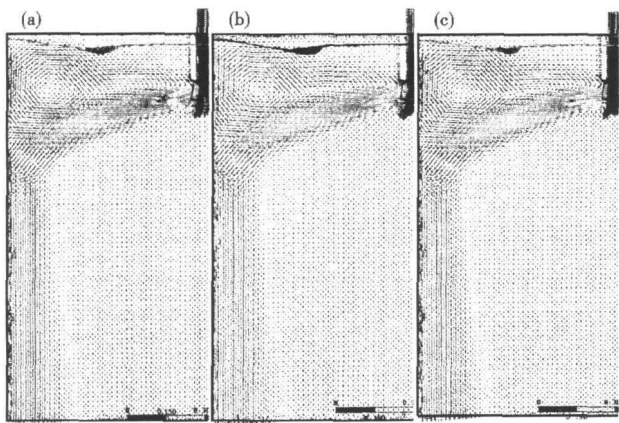


图7 水口出口倾角(a- 15°; b- 10°; c- 5°)对结晶器内流场的影响

Fig. 7 Effect of nozzle outlet angle (a- 15°; b- 10°; c- 5°) on flow field in mold

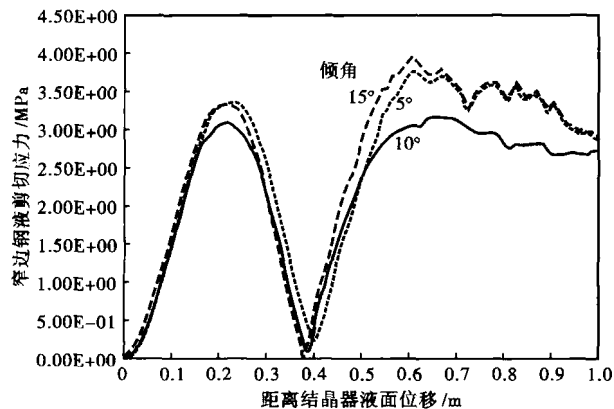


图8 No1 水口出口倾角对结晶器窄边钢液所受的剪切应力的影响

Fig. 8 Effect of No1 nozzle outlet angle on shear stress of liquid at narrow side of mold

不是随着角度的减小而趋于稳定,从结晶器内钢-渣体积分数图可以看出,在倾角为10°时,钢-渣界面较稳定,而在倾角15°和5°时,钢渣卷混严重,钢-渣界面活跃,易发生卷渣。从图8 No1水口出口倾角不同的结晶器窄边所受的剪切应力可以看出,在倾角为10°时窄边所受高温钢液剪切应力较小。综合分析认为,对于200 mm × 1 550 mm 不锈钢板坯连铸结晶器水口出口倾角为10°左右较为合适。

3 结论

(1)原水口的结晶器流场上回流过强,钢-渣界面不稳定,结晶器窄边液渣层薄,不仅容易发生卷渣,而且在结晶器窄边容易造成钢液裸露。

(2)通过将原水口的V型底部改成凹型底部后,上回流强度得到一定减弱,钢-渣界面稳定,窄边液渣层厚度增加,结晶器窄边高温钢液剪切应力减弱。

(3)随着出口形状的锥度减小,液渣层钢渣卷混严重,窄边液渣层厚度变薄,而且结晶器窄边所受高温钢液剪切应力增加。

(4)水口出口向上倾角10°时,结晶器内流场较为合理,钢-渣界面较为稳定,窄边所受高温钢液剪切应力较小。

(5)200 mm × 1 550 mm 不锈钢板坯连铸结晶器最佳水口结构设计:凹型底部 + 水口出口形状No1 + 向上倾角10°。

参考文献

- 1 杨 军. 高表面质量不锈钢板坯连铸工艺研究. 钢铁, 2007, 42 (9): 24
- 2 Quan Y, Thomas B G. Transport and Entrapment of Particles in Continuous Casting of Steel. *Molding of Casting, Welding, and Advanced Solidification Processes-XI*, 2006: 745
- 3 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
- 4 包燕平, 祝三胜. 薄板坯连铸机浸入式水口的结构优化. 北京科技大学学报, 1999, 21 (2): 135
- 5 Huang X, Thomas B G. Modeling of Transient Flow Phenomena in Continuous Casting of Steel. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1998, 37 (3): 197
- 6 Hirt C W, Nichols B D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39 (1): 21

邓南阳 (1981-), 男, 硕士研究生, 工程师, 炼钢和连铸工艺研究。

收稿日期: 2009-12-09