宽板坯结晶器浸入式水口结构优化的数值模拟

沈巧珍，朱必炼

（武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室，湖北 武汉 430081）

摘　要：以某钢厂宽板坯连铸结晶器为研究对象，利用商业软件 PHOENICS 建立一个三维有限差分模型，模拟宽板坯连铸结晶器内钢液的流动分布。通过分析水口底型、倾角、插入深度等工艺参数对钢液面波动、流股对结晶器窄面的冲击力及涡心高度的影响，得出适用于宽规格结晶器的合理的浸入式水口。通过研究，为优化宽板坯结晶器内钢液的流场及浸入式水口的设计提供了科学依据。

关键词：宽板坯连铸；结晶器；浸入式水口；数值模拟

中图分类号：TF777.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1004－7638(2007)01－0013－05

Numerical Simulation of Optimizing SEN Structure for Wide Slab Caster Mold

Shen Qiaozhen, Zhu Bilian

(Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: The fluid flow in a wide slab continuous caster mold was simulated by a three－dimensional model set up using the commercial software PHOENICS. The effects of the nozzle bottom construction, outlet angle and immersion depth of SEN (submerged entry nozzle) on the wave amplitude of the fluid near the interface was tested, and the influence of fluid flow on the impetus to narrow side of mold and the level of vortex center was also tested. So the reasonable SEN structure was put forward for the wide slab caster mold, this could be an available basis for optimum fluid flow and SEN design of a wide slab continuous caster mold.

Key words: continuous casting of wide slab; mold; SEN; numerical simulation

0　引言

某钢厂新建的宽板坯连铸机浇注断面 230 mm×(1 350～2 150) mm，其最大宽厚比达 9.3，无论从结晶器形状与断面范围，都有别于厂内原有铸机，但其水口结构是参照原铸机设计的，钢液在结晶器内的流动情况不是很清楚。生产中铸坯表面纵裂时有发生，且存在结晶器内钢液偏流现象，较大的断面宽度造成窄边液面温度过低的现象。为此，对宽板坯连铸结晶器的浸入式水口结构及工艺参数进行了优化研究。

1　工艺条件

宽板坯铸机工艺参数见表 1。结晶器为直弧型连铸机，配有在线调宽和漏钢预报系统，采用电磁涡流检测仪进行结晶器液面自动控制。能够在线调节频率、振幅，振动频率范围为20～200 次/min，振动

收稿日期：2006－08－20

作者简介：沈巧珍(1954—)，女，上海人，武汉科技大学副教授，主要从事冶金传递过程研究。

表 1 宽板坯铸机工艺参数

Table 1 Technological parameters of wide Slab Caster mold

结晶器	流数	拉速/m·min^{-1}	铸坯宽度/m	铸坯厚度/mm	结晶器高度/m
直弧型	2	0.5 ~ 1.5	1.800 ~ 2.150	210 ~ 250	0.9

行程为 0 ~ 12 mm,振幅有 ± 3 mm、± 4 mm、± 5 mm、± 6 mm 共 4 档。

结晶器的基本参数见图 1,水模实验时模型按 3:1 缩小,由于 $Re_{原} = \rho vl/\mu = 3.8 \times 10^4$, $Re_{模} = \rho' v' l'/\mu' = 3.0 \times 10^5$,均处于第二模化区,可以满足模型和原型相似。本文结合水模实验,模拟分析了原水口条件下铸坯断面尺寸为 2 000 mm × 230 mm,对应的浇注速度为 1.01 m/min 时的流场情况,并提出新的水口结构。原水口结构和拟优化水口结构如图 2 所示。

针对优化水口,将水口底部结构,出口倾角和插入深度等因素作为水平,利用正交设计方法设计出新水口的 12 种方案,通过模拟选出最佳结晶器水口结构尺寸和工艺参数。

2 数学模型的建立

2.1 基本假设

(1)钢液流动为不可压缩稳态流动,密度为常数。

(2)忽略结晶器内凝固壳对钢液流动的影响。

(3)忽略结晶器弯月面波动的影响。

(4)忽略结晶器振动对流场的影响。

(5)钢液流动由水口出口初始速度驱动。

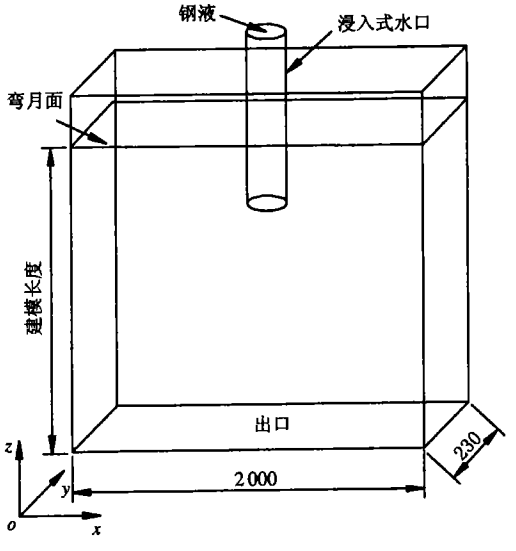
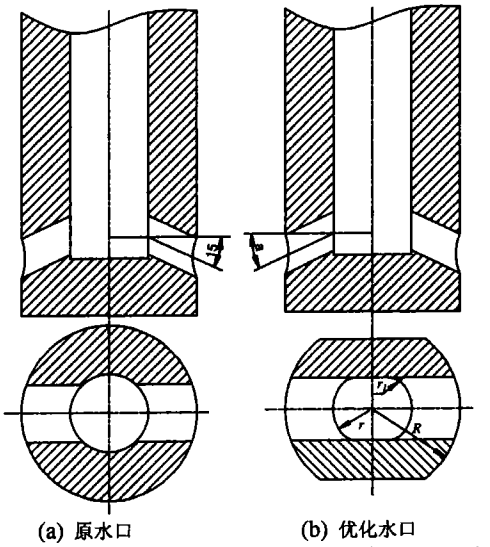


图 1 结晶器示意图

Fig.1 Schematic plan of mold



(a) 原水口 (b) 优化水口

(a) Original nozzle (b) Optimum nozzle

图 2 浸入式水口结构示意图

Fig.2 Schematic plan of SEN structure

2.2 控制方程

结晶器内钢液流动属湍流流动,在结晶器内同时进行着两个过程:在水冷结晶器壁上凝成坯壳和注入钢流在结晶器内的运动与传热,描述该过程钢液流动的基本微分方程有[1]:

连续方程: $$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

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

k 方程: $$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \times \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G - \rho\varepsilon \quad (3)$$

ε 方程:

$$\rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \times \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + \frac{(c_1 G\varepsilon - c_2 \rho\varepsilon^2)}{k} \quad (4)$$

其中: $$G = \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$

式(1) ~ (4)中,

ρ—流体密度,kg/m^3;

μ_i—分别为湍流流动在 x、y、z 方向的速度,m/s;

μ—层流粘性系数;

μ_t—湍流粘性系数;

k—湍流动能,m^2/s^2;

ε—湍流动能耗散率,m^2/s^3。

上述方程中 $c_1, c_2, c_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为经验常数,采用 Launder 和 Spalding 的推荐值[2]: $c_1 = 1.43, c_2 = 1.93, c_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$。

2.3　边界条件

①结晶器内自由液面上:把垂直自由液面的速度设为零,其它物理量沿法线方向的梯度设为零;②入口边界:对于浸入式水口,可由拉速根据流量平衡原理确定水口钢液流速;③出口边界:结晶器出口处为一维流动,各物理量沿该截面法线方向的导数为零;④结晶器壁面上:在结晶器内壁面附近的粘性边界层中,湍流计算一般采用低雷诺数的 $k-\varepsilon$ 模型或壁面函数法。

2.4　计算方法

利用上述微分方程(1)~(4)及边界条件建立数学模型,应用商业软件 PHOENICS 对中间包内的钢液流动进行模拟计算。鉴于结晶器形状的对称性,取结晶器的四分之一作为计算区域,计算网格数为 45×11×50(宽×厚×高)。

3　计算结果分析与讨论

3.1　流场的基本特征

钢液在结晶器中的总体形态是一致的:钢液从水口流出后沿直线流向窄面,且在行进过程中不断扩张,流速逐渐降低,到达窄面后分为上升流和下降流两大流股。其中向下流股是主流股,此流股对夹杂物的上浮、结晶器下端及二冷段的结晶组织产生直接影响,强度随着向下距离的延伸而减弱;上升流股沿窄面向上流动,在自由表面附近形成两个回流区,这个回流对弯月面的波动产生影响较大,同时也对保护渣的熔化起决定性作用,其强弱取决于水口底部结构、出口倾角和插入深度等参数。图 3 为凹底水口、插入深度 120 mm、倾角为向下 15°时的结晶器内的钢液流场。

在结晶器内钢液流动行为对铸坯表面质量影响最为关键的是弯月面处的钢液流动状态和流股对结晶器窄边的冲击状态,前者主要表现在结晶器内液面速度大小,而速度大小与液面湍动能的分布状态有关,后者主要表现在流股对结晶器窄边的冲击力的分布状态[3]。下文从水口底部结构、出口倾角和

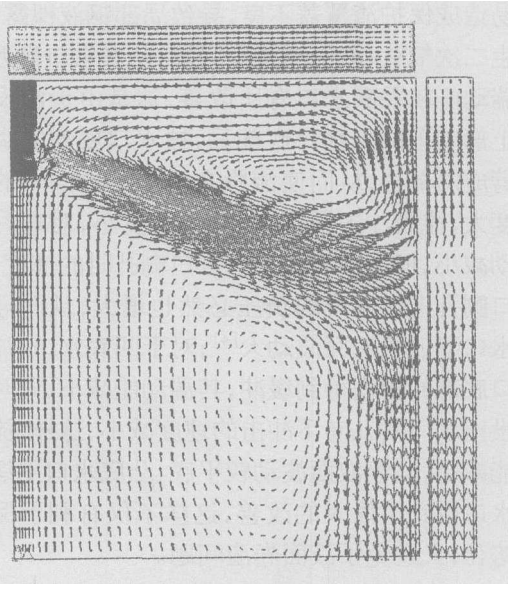


图 3　结晶器内流场基本特征

Fig.3　Main characteristic of flow field in the mold

插入深度等参数出发,用钢液面湍动能曲线表征液面稳定性,用射流冲击板坯窄面处压强表征机械冲压,用冲击深度表征夹杂物的上浮能力作为评价指标进行讨论。

3.2　水口底部结构对流场的影响

液面的湍动能分布直接影响钢液面扰动的大小,图 4 给出了水口底型结构对液面湍动能的影响曲线。从图 4 看出,使用原水口浇注时钢液面湍动能过小,钢液回流速度低,而钢液面的温度是靠钢液交换来稳定的,当钢液交换速度变慢后,导致钢液面温度较低,容易发生保护渣结壳等现象。

优化水口的液面湍动能均得到了较大的改善,其中平底水口弯月面过于活跃,液面波动幅度较大,

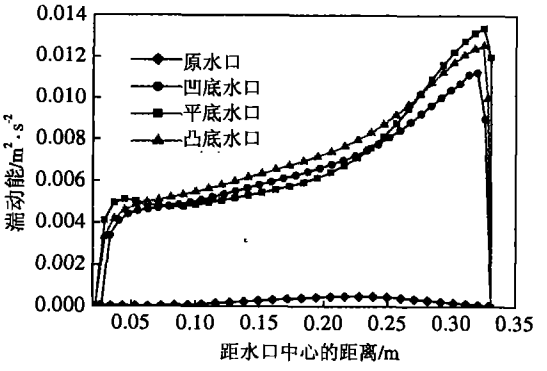


图 4　不同底型水口的液面湍动能分布曲线

Fig.4　Distribution curve of turbulent flow energy at liquid level with different bottom configuration of SEN

容易造成保护渣覆盖不良，导致局部钢液裸露，随之产生二次氧化、液面卷渣等问题；凸底水口靠近窄边的湍动能较平底水口有所改善，这是由于流股从水口上部向下冲到水口底部后，被水口底部的尖叉直接劈成两部分，从而使流股在结晶器内向下的冲击速度大，流股冲击深度深，总体速度小，对弯月面的扰动减小，但由于流股流出水口侧孔时的速度大，在水口侧孔上部造成的负压必然也增大，从而导致靠近水口附近的液面波动大[4]；对于凹底水口，流股在水口底部的槽内得到缓冲，其湍动能减小，同时也使流股出水口侧孔向下冲击的速度减小，这样，流股的动能减小，其钢液面波动较平底、凸底水口平缓而较原水口得到了很大的改善，这样不仅有利于保护渣的熔化，又避免了液面卷渣问题。

水口底部结构对窄边冲刷压力的影响如图 5 所示。采用原水口时，冲击点最低且冲击点上部的流股冲刷压力较小，并且有一小区域压力接近于零，导致此处的钢液不活跃，容易形成结冷钢现象；采用优化水口，冲击点位置升高，强度增大，窄边上部的冲刷力相应增加，底部的冲刷力降低。其中，凹底水口流股对窄边底部的冲刷力小，而上部的冲刷力最强，这样既有利于凝固初生坯壳的生长，又能改善钢液流动，有效地防止冷钢的形成。

上面分析表明，水口底部形状对结晶器内钢液流场有很大影响，水口参数优化组合应包括底部形状，即优化结果应和水口底部形状相对应。此铸机属宽板坯连铸机，拉速较高，采用凹底结构水口可减小流股的冲击深度，改善液面的湍动能和窄边的冲

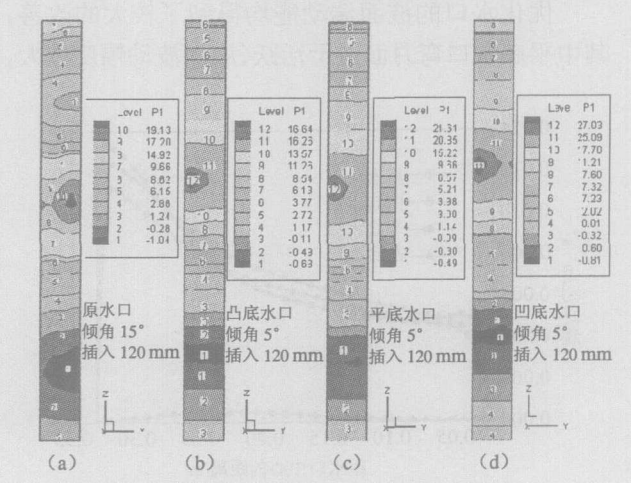


图 5 水口底部结构对窄面冲刷力的影响

Fig.5 Effect of SEN bottom configuration on the impact pressure at narrow side

击压力，有利于夹杂物的去除和保护渣的熔化，避免二次氧化和液面卷渣等问题。

3.3 插入深度对流场的影响

不同插入深度、水口出口倾角条件下，流股对水口的窄边冲刷力的影响如图 6 所示。对四种水口而言，随着水口插入深度的增大，流股冲击点的位置均向下移动，且沿水口出口上部窄边的冲刷力急剧变小，由图 6 可见，当插入深度为 160 mm 时，在钢液面附近剪切力过于偏小，此处保护渣容易结壳。同时随着插入深度的增加，上下部回流区的涡心也明显下移，这样对夹杂物的上浮不利。因此，选择水口浸入深度 $H = 120$ mm 较合适。

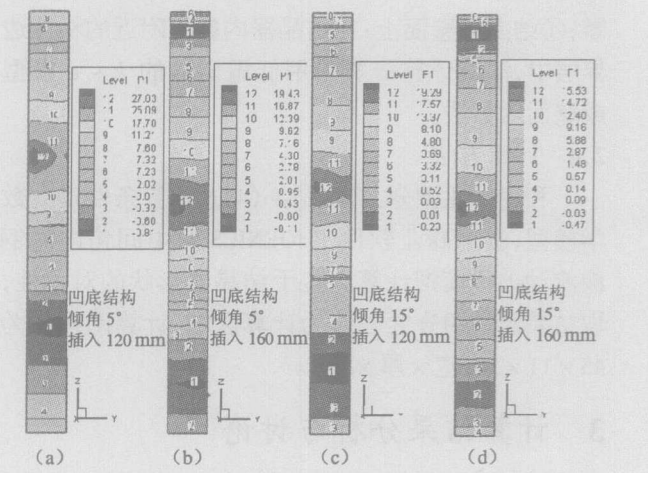


图 6 不同水口参数对窄面冲刷力的影响

Fig.6 Effect of different SEN parameters on the impact pressure at narrow side

3.4 出口倾角对流场的影响

从流股对窄面的冲刷力分析，倾角由 5°增大到 15°，涡心和冲击深度都向下移动，但没有水口插入深度的影响大。随着水口出口倾角的加大，对液面的平稳是有利的，从对窄边的冲刷力来看，15°时的冲刷力比 5°时的冲刷力平稳，这对初生坯壳的均匀生长有利，因此取水口出口向下倾角为 15°。

3.5 优化后的水口结构及工艺参数

通过对水口底型结构、插入深度和出口倾角的分析，选出最佳结晶器水口结构尺寸和工艺参数为：凹底结构、插入深度 120 mm、倾角为向下 15°。

优化水口与原水口模拟结果特征值见表 2。

4 结论

通过对某钢厂宽规格结晶器水口结构的优化及钢液流场的数值计算，分析了水口底型结构、插入深

表 2　数值模拟结果特征值

Table 2　Eigenvalues of numerical simulation result

水口	上涡心高度/mm	下涡心高度/mm	冲击点/mm	冲击点压强/Pa	平均速度/$m \cdot s^{-1}$	液面平均湍动能/$m^2 \cdot s^{-2}$
原水口	252	942	504	19.13	0.098	2.15×10^{-4}
优化水口	233	861	546	19.29	0.102	6.53×10^{-3}

度和出口倾角等参数对液面湍动能、冲击深度和窄面冲击压力分布的影响。经过数值计算,满足宽规格结晶器工艺条件下的浸入式水口及工艺参数为:凹底结构、插入深度 120 mm、倾角为向下 15°。

参考文献:

[1] Gan Yong, Qiu Shengtao, Xiao Zeqiang. Numerical and Physical Simulation of Continuous Casting Process[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001. 121 - 128.
(干　勇,仇圣桃,萧泽强.连续铸钢过程数学物理模拟[M].北京:冶金工业出版社,2001.121 - 128.)

[2] Launder B E, Spalding D B. The Numerical Computation of Turbulent Flow[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Eng., 1974, (3): 269.

[3] Ma Fanjun, Wen Guanghua, Li Gang. Numerical Value Simulation of Hot Metal Flowing in Slab Concaster Mould[J]. Research on Iron and Steel, 2000, (1): 10 - 14.
(马范军,文光华,李　刚.板坯连铸结晶器内钢液流动数值模拟[J].钢铁研究,2000,(1):10 - 14.)

[4] Wan Xiaoguang, Han Chuanji, Cai Kaike, *et al*. Experimental Research of Submerged Entry Nozzle of Slab Continuous Casting[J]. Iron and Steel, 2000, (9): 20 - 22.
(万晓光,韩传基,蔡开科,等.连铸板坯结晶器浸入式水口试验研究[J].钢铁,2000,(9):20 - 22.)

编辑　余文华

(上接第 12 页)

参考文献:

[1] Yang Jinshan. Present State and Perspectives of Tire Core Steel[J]. Metal Products, 1986, 12(2): 6 - 7.
(杨金善.轮胎钢丝及钢帘线的生产现状及发展[J]. 金属制品,1986,12(2): 6 - 7.)

[2] Michel Baroux, Gerard Mangel. Wire Journal Intfrnational[J]. STEEL ROD, 1984, APRIL, 67.

[3] Maeda S, Soejima T, Saito T, *et al*. Shape Control of Inclusions in Wire Rod for High Tensile Tire Cord by Refining with Synthetic Slag [A]. Steelmaking Conference Proceedings[C], 1989, 379 - 385.

[4] Turkdogan E T. Physical Chemistry of High Temperature Technology [M]. New York: Academic Press, 1980.

[5] Shinsho Y, Nozaki T. Inference of Secondary Steelmaking on Occurrence of Nonmetallic Inclusions in High - carbon Steel for Tire Cord [J]. Wire J. Int.. 1998, (9): 145 - 153.

[6] Martin Gagne, Eric Thibault. Control of Inclusion Characteristics in Direct Cast Steel Billets[J]. Canada Institute of Mine and Metal, 2000, (8): 312 - 321.

编辑　余文华