

# 230mm 厚板坯结晶器浸入式水口结构的优化研究

孙国敏, 彭勇生, 李志伟, 李洪鹏

宁波钢铁有限公司, 浙江 宁波 315807

## Optimization study of immersion nozzle structure of 230mm thick slab crystallizer

Sun Guomin, Peng Yongsheng, Li Zhiwei, Li Hongpeng

Ningbo Iron and Steel Co., Ltd., Ningbo 315807, China

### 1 前言

随着冶金技术的发展, 钢厂对连铸板坯的质量要求越来越高。浸入式水口作为连接中间包和结晶器的桥梁, 在连铸生产中起到至关重要的作用。水口形状对结晶器内钢液的流场、传热、凝固均有较大影响。结晶器内钢液的流动主要依靠浸入式水口流股的冲击, 结晶器内上下回流区对结晶器内夹杂物上浮、结晶器液面稳定性有重要影响<sup>[1,2]</sup>。

前人通过数值模拟及物理模拟的方法研究了不同浸入式水口对结晶器内钢液流动、传热、凝固过程的影响。袁静<sup>[2]</sup>通过数值模拟方法研究了浸入式水口结构、拉速对结晶器流场的影响, 并对结构和工艺进行优化; 张洪才<sup>[3]</sup>研究表明侧孔浸入式水口相比传统直通浸入式水口可以有效减少钢中大尺寸夹杂物; 本文以某厂 230 mm 厚板坯结晶器为研究对象, 针对浸入式水口寿命低、结晶器液面不稳定等问题, 通过对渣线部位加粗和改变水口内腔形状的措施对浸入式水口进行改进, 使用数值模拟方法研究浸入式水口结构和拉速对结晶器流场的影响, 并通过工业试验为后续生产提供理论和实践的指导。

### 2 数学模型

#### 2.1 基本假设及边界条件

模拟假设: (1)钢液为不可压缩流动牛顿流体; (2)不计结晶器液面的波动及传热, 把液面设置为自由面; (3)不考虑结晶器内凝固壳的存在, 计算区域的边界为达到但不包括糊状区的位置; (4)忽略结晶器振动及锥度等因素的影响<sup>[4]</sup>。

边界条件: (1)浸入式水口入口采用速度入口边界, 入口的速度垂直于所在的面; (2)出口采用自由出口边界, 各变量的法向梯度为 0; (3)对所有壁面采用无滑移边界条件<sup>[5]</sup>。

#### 2.2 控制方程

浸入式水口结晶器装置内的流体流动遵循的基本方程包括连续性方程和动量守恒方程。湍流模型采用标准  $k-\varepsilon$  双方程, 不做展开。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为钢液的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\vec{v}$  为流体的速度,  $\text{m/s}$ 。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}}(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

式中： $P$  为压力，Pa； $\mu_{q,eff}$  为有效黏度， $Pa \cdot s$ ； $\vec{g}$  为重力加速度矢量， $m/s^2$ 。

### 2.3 几何尺寸及网格划分

三种浸入式水口的尺寸见表 1，其中 a 为某厂的常规水口，b 是渣线部位加粗型水口，c 为椭圆加粗型水口。截取三种浸入式水口渣线部位的横截面，如图 1 所示。以某厂 230mm×1650mm 板坯连铸结晶器为研究对象，拉速为 1.0 m/min，浸入深度为 150mm。浸入式水口结晶器采用混合网格划分，网格数量为 30 万左右，a 号水口结晶器网格划分如图 2 所示，其他就不列举了。

表 1 浸入式水口的结构参数

Table 1 Structural parameters of immersion nozzles

浸入式水口 编号	水口内腔截面 形状	水口流通面积/mm <sup>2</sup>	渣线厚度/mm	侧出孔面积/mm <sup>2</sup>
a	圆形	164855	30	64×80
b	圆形	164855	35	64×80
c	椭圆	164855	35	60×80

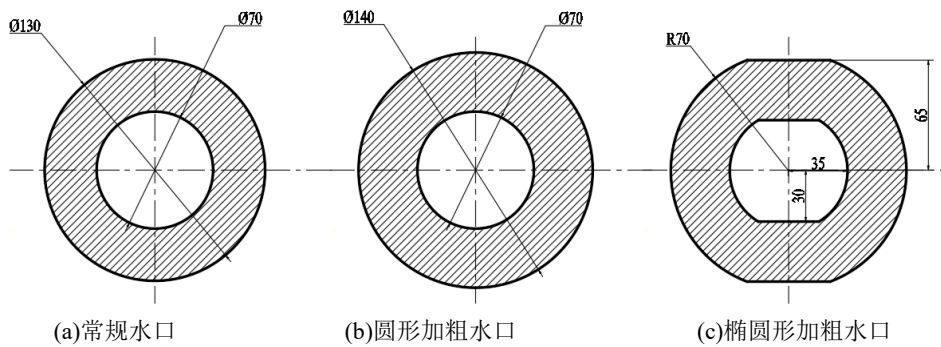


图 1 浸入式水口渣线部位的横截面

Fig. 1 Cross-section of the slag line of the immersion nozzle

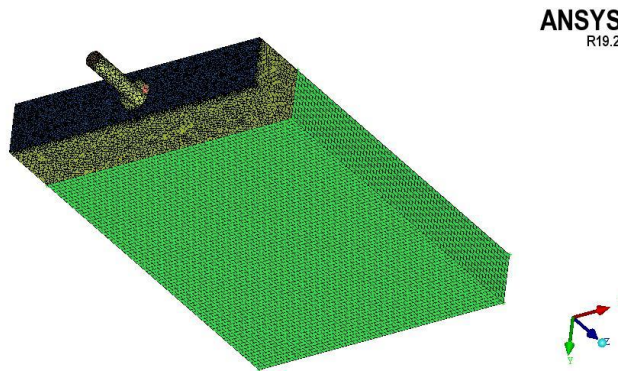


图 2 a 号水口结晶器网格划分

Fig. 2 Meshing of the crystallizer in the No. A nozzle

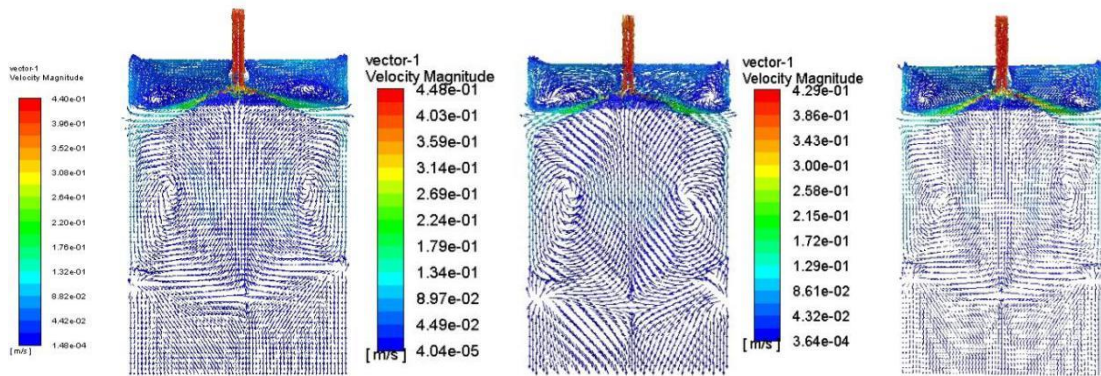
## 3 模拟结果及讨论

### 3.1 不同水口对结晶器纵截面流场的影响

通过 CFD 软件，建立单向流模型，对三种型号水口结晶器内的钢液流动进行模拟，得到的相关模拟结果如下。图 3 为三种型号水口结晶器宽面的流场。从图 3 可知，a 号水口、b 号水口和 c 号水口的结晶器宽

面流场基本一致，均表面为左右对称的上下环流。圆形水口和 c 号水口均采用双侧孔结构，钢液从两侧孔流出，冲击结晶器窄面后改变方向，形成上下的回旋区。

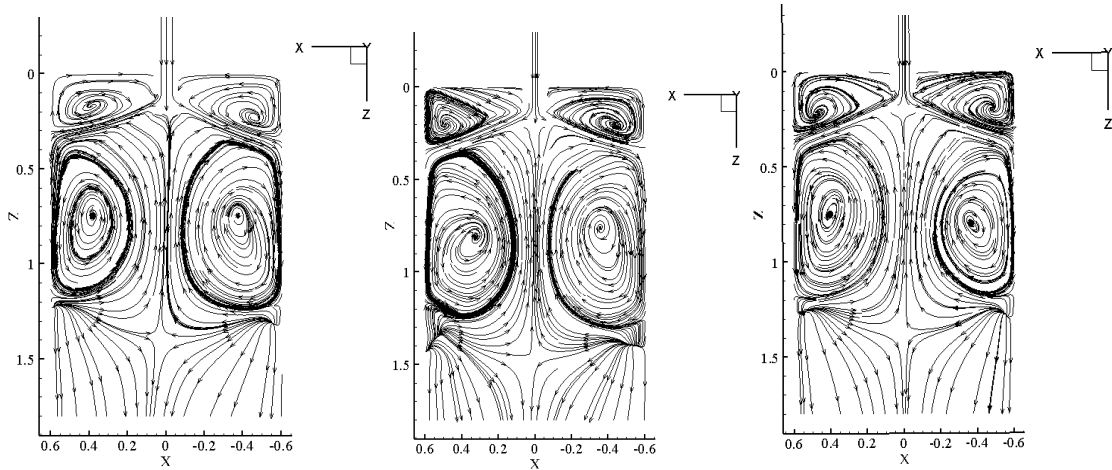
图 4 三种型号水口结晶器宽面的流场。从图 4 可知，水口底部形状从渣线直径 131mm 圆形-渣线直径 141mm 圆形-椭圆形变化时，侧孔流出的钢液对结晶器窄面的冲击深度分别为 354mm、394mm、412mm；上涡心位置分别为 201mm、214mm、223mm，下涡心位置分别为 721mm、775mm、785mm。c 号水口的冲击深度最大，其次是渣线直径为 b 号水口。在水口上端流量不变的情况下，c 号水口侧孔面积较小，侧孔流出的钢液对结晶器窄面的冲击速度增大，流股冲击深度变深，相对应上涡心高度降低，下涡心高度增加。上涡心高度降低，上回流股变弱，流股所具有的动能减少，钢液对结晶器表面的冲击强度减弱，有利于减小结晶器液面波动，但上涡心高度过低不利于保护渣熔化。下涡心过低不利于夹杂物上浮去除。渣线直径从 134mm 增加到 141mm，增加射流在侧孔的时间，间接减少了射流在钢液中的停留时间，射流的能量损失减少，流股对到结晶器窄面的冲击强度较大，相对应上涡心高度降低，下涡心高度增加。



(a) a 号水口; (b) b 号水口; (c) c 号水口

图 3 结晶器宽面流速分布

Fig. 3 Flow velocity distribution of crystallizer over a wide surface

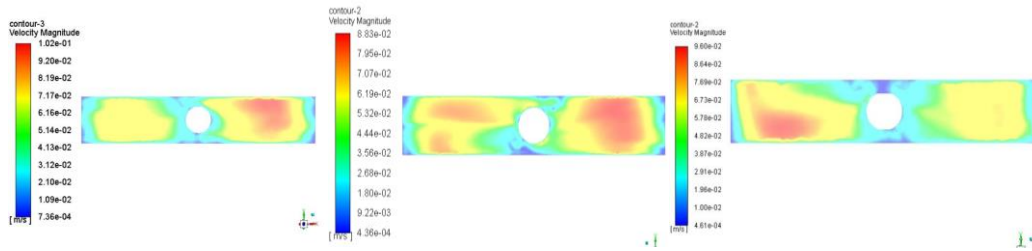


(a) a 号水口; (b) b 号水口; (c) c 号水口

图 4 结晶器宽面流线

Fig. 4 Crystallizer wide-surface streamline

### 3.2 不同水口对结晶器液面附近流场的影响



(a) a 号水口; (b) b 号水口; (c) c 号水口

图 5 结晶器液面流速

Fig. 5 Crystallizer liquid level flow rate

图 5 为三种型号水口结晶器液面的速度分布。从图 4 可知, a 号水口、b 号水口和 c 号水口的结晶器液面 X 和 Y 方向的合速度平均值分别为 0.065m/s、0.059m/s、0.058m/s。c 号水口的结晶器液面 X 方向和 Y 方向的合速度最小, 液面流速最低, 结晶器液面更稳定。

## 4 现场应用效果

试验分别采用 10 只圆形加粗水口、椭圆形加粗水口进行对比分析, 试验钢种为 SPHD 和 IF, 试验结果见表 2。b 号水口试验钢卷 3378.41t, 发生夹杂降级 33.538t, 夹杂改判率 0.99%; c 号水口试验钢卷 3635.18t, 发生夹杂降级 26.089t, 夹杂改判率 0.72%。对比同期生产 SPHD 和 IF 钢共计 22430.737t, 发生夹杂降级 221.249t, 夹杂改判率 0.99%。c 号水口的质量效果略好。

表 2 不同结构浸入式水口的试验钢卷夹杂改判率

Table 2 Test coil inclusion modification rate of immersion nozzles of different structures

浸入式水口 编号	水口类别	热卷重量/t	夹杂降级数/t	夹杂改判率
a	常规	22430.737	221.249	0.99%
b	圆形加粗	3378.41	33.538	0.99%
c	椭圆形加粗	3635.18	26.089	0.72%

## 5 结论

(1) 在拉速为 1.0 m/min 时, a 号水口、b 号水口和 c 号水口的结晶器宽面流场基本一致; a 号水口、b 号水口和 c 号水口的冲击深度分别为 354mm、394mm、412mm, c 号水口冲击深度最大。

(2) a 号水口、b 号水口和 c 号水口的结晶器液面 X 和 Y 方向的合速度平均值分别为 0.065m/s、0.059m/s、0.058m/s, c 号水口结晶器液面速度最小, 结晶器液面更稳定。

(3) SPHD+IF 试验应用 c 号水口的夹杂改判率为 0.72%, 质量效果最好。

## 参考文献

- [1]张燕超, 张彩军, 刘毅. 板坯连铸结晶器浸入式水口结构优化[J]. 铸造技术, 2018, 39 (11): 2548-2553.
- [2]袁静, 时朋召, 徐李军, 等. 250 mm 厚板坯结晶器浸入式水口结构的优化研究[J]. 连铸, 2019, 44(4): 19-25.
- [3]张洪才, 印传磊, 郑力宁, 等. 浸入式水口结构对连铸大圆坯质量的影响[J]. 中国冶金, 2022, 32(9): 57-63.
- [4] Yin Y B, Zhang J M, Xiao P C. Mathematical Modeling on Optimization of Submerged Entry Nozzle for an Ultra-Thick Slab Continuous Casting Mold [J]. Metals, 2023, 13(2): 221-221.
- [5]宁林新, 解家英, 刘金刚, 等. 220 mm×1600 mm 板坯连铸浸入式水口倾角优化的数值模拟和应用[J]. 特殊钢, 2018, 39(1): 9-12.