

# 水口堵塞对结晶器内钢液行为的影响研究

刘崇<sup>1</sup> 张彩东<sup>1</sup> 李杰<sup>1</sup> 丁志军<sup>2</sup> 田志强<sup>1</sup> 王强<sup>1</sup> 霍彦朋<sup>2</sup>

(1. 河钢材料技术研究院, 河北 石家庄 050023; 2. 石家庄钢铁有限责任公司, 河北 石家庄 050031; )

## Effect of Nozzle Clogging on Behavior of Molten Steel in Mold

Liu Chong<sup>1</sup> Zhang Caidong<sup>1</sup> Li Jie<sup>1</sup> Ding Zhijun<sup>2</sup> Tian Zhiqiang<sup>1</sup> Wang Qiang<sup>1</sup>  
Huo Yanpeng<sup>2</sup>

(1. HBIS Material Technology Research Institute, Shijiazhuang 050023; 2. Shijiazhuang Iron & Steel Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, China)

### 1. 前言

在连铸生产过程中, 液态钢水中含有的非金属夹杂物在浇筑过程中由于湍流作用而附着于水口内壁, 进而引起水口结瘤, 造成结晶器液面不同程度的波动, 此时, 若不及时更换水口, 结晶器内钢液容易发生偏流而造成卷渣等事故, 导致对应的铸坯降级或是判废<sup>[1-3]</sup>。因此, 稳定的结晶器流场对改善铸坯质量、进一步提高生产效率均具有重要的意义<sup>[4]</sup>。

本文以某钢厂异型坯连铸机为研究对象, 针对现场水口堵塞 0%、5%、10% 三种浇筑模式, 分别建立了三维异型坯结晶器数学模型, 通过 CFD 模拟计算, 对比分析了结晶器在水口结瘤条件下的流动情况与钢渣形貌行为。

### 2. 数值模拟

#### 2.1. 研究方案

表 1 所示为数值模拟计算过程所需的技术参数, 异型坯结晶器尺寸为 750mm×450mm×120mm, 浇筑过程浸入式水口插入深度为 100 mm, 拉速为 0.75 m/min。结瘤水口出口两侧尺寸分别为 25 mm×40 mm、25 mm×38 mm、25 mm×36 mm, 正常水口出口两侧尺寸为 25 mm×40 mm。

表 1 技术参数

Table 1 Technical Parameters

参数	数值
结晶器尺寸/(mm×mm×mm)	750×450×120
浸入深度/mm	100
水口长度/mm	730
水口内径/mm	50
水口外径/mm	100
水口底部形状	凹底
水口出口断面/(mm×mm)	25×40、25×38、25×36
拉速/(m/min)	0.75

浸入式水口下部为圆柱形, 其结构示意图如图 1 所示:



### 3.1. 水口堵塞程度对冲击深度和涡心高度的影响

在不同的水口堵塞程度（堵塞 0%、堵塞 5%、堵塞 10%）下结晶器内部的流场矢量图见图 2。由图可见，钢液从水口流出后碰撞到结晶器壁面改变流动方向，最后在两个出水口的下方呈现两个由外向内的涡流，但因结瘤导致的出口尺寸差异使流场整体形貌明显不对称，且随着水口堵塞程度的加深钢液涡心位置逐渐下移，结晶器内的冲击深度也相应增大<sup>[10]</sup>。

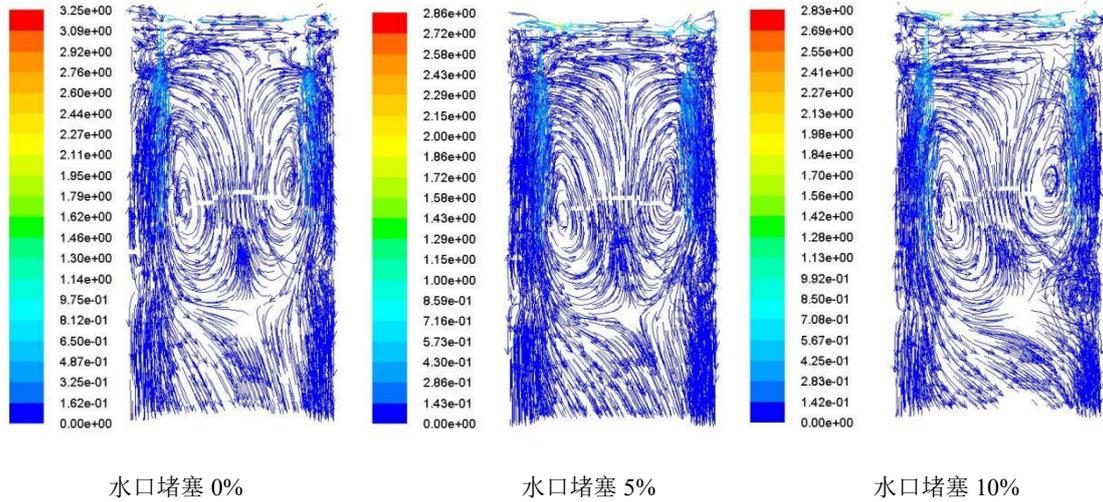


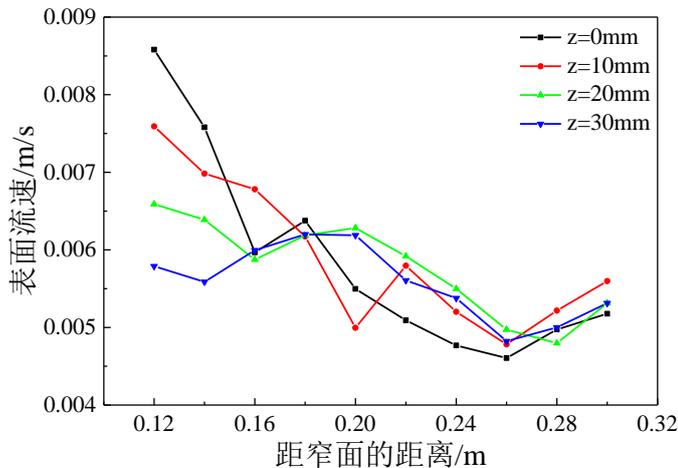
图 2 不同堵塞比例下的水口矢量图

Fig. 2 Nozzle vector diagram under different blockage ratio

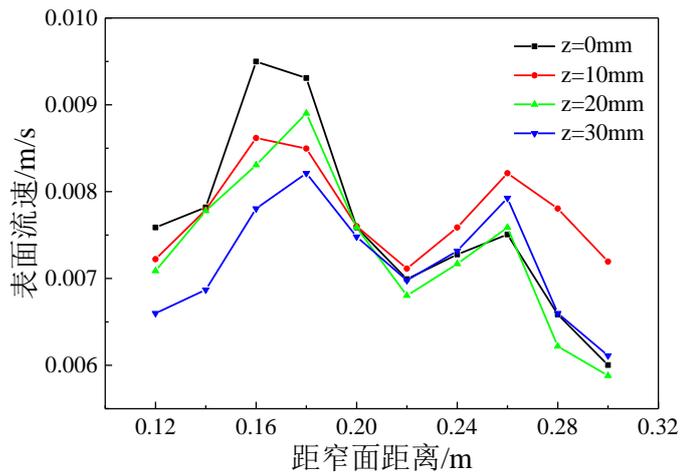
### 3.2. 水口堵塞程度对钢渣表面流速的影响

图 3 显示了不同水口堵塞条件下沿腹板方向上相同位置的表面流速。由图可以看出，沿腹板方向，在距窄面距离相同时，当钢液距离腹板中心线距离变化（ $z$  值变化）时，表面流速稍有波动，但无明显规律；而钢液沿腹板中心线的表面流速却显示了非常大的波动<sup>[11]</sup>。当水口堵塞程度变化时，表面流速大小相应变化，其流速波动曲线没有呈现明显的规律性<sup>[12]</sup>。

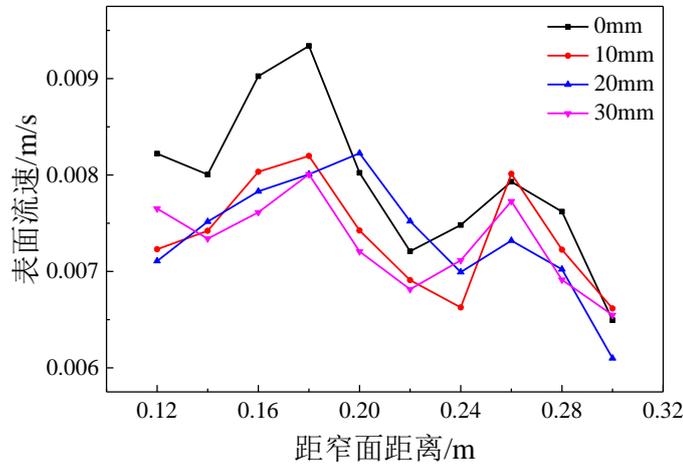
计算可知水口堵塞 0%、水口堵塞 5%、水口堵塞 10%时，对应的表面流速平均值分别为 0.00563m/s、0.00716m/s、0.00756m/s。可见钢液表面流速随着水口堵塞程度的增加而逐渐增大，推断出结晶器液面波动幅度也相应增大。



(a) 水口堵塞 0%



(b) 水口堵塞 5%



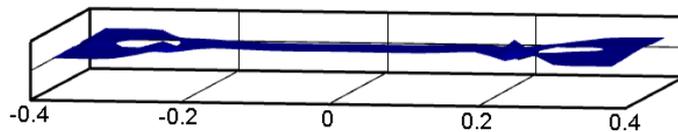
(c) 水口堵塞 10%

图 3 不同水口堵塞条件下沿腹板方向(X 方向)上同位置的表面流速

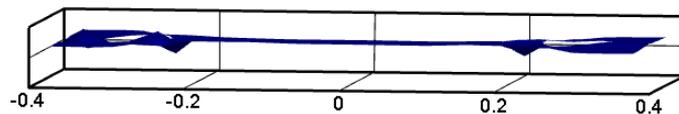
Fig. 3 Surface velocity at the same position along the web direction (X direction) under different nozzle clogging conditions

### 3.3. 水口堵塞比例对液面波动的影响

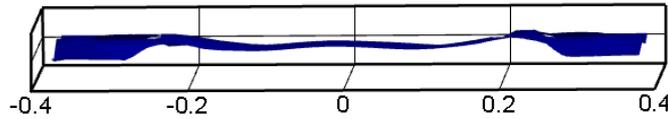
基于数值模拟结果分析可得，结晶器表面钢液流速随水口堵塞比例的增加而逐渐增大，并且表面波动趋势也相应增大。当水口堵塞 0%、5%、10%时，翼板方向所对应的液面波高差分别为 3.2mm、4.7mm、6.2mm，从图 4 示意图也可以看出，随着堵塞比例的增大，结晶器自由液面的波动也越来越剧烈。



(a) 水口堵塞 0%



(b) 水口堵塞 5%



(c) 水口堵塞 10%

图 4 不同水口堵塞比例下的液面波动情况

Fig. 4 Fluctuation of liquid level under different nozzle clogging ratio

基于以上分析，在拉速等条件不变的情况下，随着浸入式水口堵塞比例的增加，结晶器内涡心位置逐渐下移，钢液在结晶器内的冲击深度增大，液面波幅增加。当水口堵塞 5%、水口堵塞 10%时，相较于不堵塞的情况下所对应的表面流速平均值分别增大 27.17%与 34.28%，液面波高分别增大 46.88%、93.75%。

因此水口的堵塞比例对于结晶器内的流场特征并没有发生明显变化，但对于结晶器的钢渣表面流速与液面波动情况结晶器影响程度激烈，因此为保证产品质量，在实际生产过程中应避免水口堵塞现象的发生与恶化。

## 4. 结论

- (1) 随着水口堵塞比例的增加，结晶器内钢液涡心位置下移、冲击深度增大。
- (2) 水口堵 0%、堵塞 5%、堵塞 10%时，翼板方向所对应的液面波高差分别为 3.2mm、4.7mm、6.2mm。
- (3) 当水口堵塞 5%与堵塞 10%时，相较于不堵塞的情况下所对应的表面流速平均值分别增大 27.17%与 34.28%。

## 参考文献

- [1]张华, 王家辉, 方庆, 倪红卫.中间包非稳态浇注过程数值模拟研究进展[J].辽宁科技大学学报, 2021, 44(06):401-412.
- [2]王新华.高品质冷轧薄板钢中非金属夹杂物控制技术[J].钢铁, 2013, 48(09):1-7.
- [3]田贵昌, 季晨曦, 高荣正, 刘中秋, 李宝宽.连铸结晶器内水口结构对卷渣行为影响的物理模拟[J].炼钢, 2021, 37(06):38-44+58.
- [4]马浩冉, 李双江, 刘洪波, 刘崇, 姚柳洁.水口结瘤对板坯连铸结晶器钢水行为影响的数值模拟[J].连铸, 2020, 45(03):14-17.
- [5]黄诚, 李晓谦, 陈平虎, 徐婷.宽厚板坯连铸结晶器流场、温度场及应力场的耦合数值模拟[J].工程科学学报, 2016, 38(08):1098-1107.
- [6]王波, 沈诗怡, 阮琰炜, 程淑勇, 彭望君, 张捷宇.冶金过程中的气液两相流模拟[J].金属学报, 2020, 56(04):619-632.
- [7]周秋月, 朱坦华, 张立峰, 陈威, 袁天祥, 刘珍童.非稳态浇铸对结晶器卷渣定量影响的大涡模拟[J].钢铁, 2022, 57(04):68-78.
- [8]张彩军, 张立志, 王超.矩形坯浸入式水口优化的物理模拟[J].河北联合大学学报(自然科学版), 2012, 34(03):38-41.
- [10]李济永, 张立峰, 王强强.板坯连铸结晶器内流场数值模拟[J].过程工程学报, 2012, 12(06):925-932.
- [11]刘淼, 刘中秋, 吴颖东, 雷琪安, 李宝宽.吹氩连铸结晶器液面波动行为的时频分析[J].中国冶金, 2022, 32(07):35-43.
- [12]熊霄, 邓小旋, 王新华, 黄琦, 张弘弼.水口出口形状对高拉速板坯连铸结晶器内流场特征的影响[J].钢铁研究学报, 2014, 26(07):35-40.