

## 220 mm × 1 600 mm 板坯连铸浸入式水口倾角优化的数值模拟和应用

宁林新<sup>1,2</sup> 解家英<sup>1,2</sup> 刘金刚<sup>1,2</sup> 张利君<sup>1,2</sup>

(1 首钢技术研究院,北京 100043;2 绿色可循环钢铁流程北京市重点实验室,北京 100043)

**摘要** 使用数值模拟方法研究了拉速 0.9 m/min 时,水口倾角  $-7^\circ \sim -11^\circ$  对 220 mm × 1 600 mm 板坯结晶器内坯壳厚度、坯壳温度和自由液面流动的影响。模拟和应用结果得出,以拉速 0.8 m/min,水口倾角  $-15^\circ$  工艺下钢液流动为标准,通过对比计算结果与标准工艺曲线,确定在 0.9 m/min 拉速时,水口倾角为  $-11^\circ$  为最佳工艺方案。生产应用结果表明,采用优化工艺后结晶器窄面报警频率由原 15 次/月降至 0 次/月,铸坯表面质量也有一定改善。

**关键词** 220 mm × 1 600 mm 板坯 连铸 结晶器 浸入式水口 倾角 数值模拟

## Numerical Simulation on Optimization of Inclination of Submerged Nozzle for 220 mm × 1 600 mm Slab Casting and Application

Ning Linxin<sup>1,2</sup>, Xie Jiaying<sup>1,2</sup>, Liu Jingang<sup>1,2</sup> and Zhang Lijun<sup>1,2</sup>

(1 Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043; 2 Beijing Key Lab for Green Recyclable Process for Iron and Steel Production, Shougang Group, Beijing 100043)

**Abstract** The effect of inclination of submerged nozzle  $-7^\circ \sim -11^\circ$  with casting speed 0.9 m/min on shell thickness, shell temperature and free surface flow in mold for 220 mm × 1 600 mm slab has been studied by numerical simulation method. The simulation and application results show that taking liquid steel flow with casting speed 0.8 m/min and inclination of nozzle  $-15^\circ$  as criterion and compared calculation results with criterion process curves the optimizing process scheme is nozzle inclination  $-11^\circ$  with casting speed 0.9 m/min. Commercial production application results show that after using the optimization process the mold narrow face alarm rate of recurrence per month from 15 times to 0 time and the quality of cast slab surface has definite improvement.

**Material Index** 220 mm × 1 600 mm Slab, Continuous Casting, Mold, Submerged Nozzle, Inclination, Numerical Simulation

连铸结晶器是连铸机最重要的设备,也是连铸坯各种缺陷和质量问题的源头,因此,它的运行情况直接影响着连铸机的生产效率和铸坯质量<sup>[1]</sup>,现场的经验研究表明,结晶器内的流动状况与铸坯的质量密切相关。不合理的流场将引起表面流速过大,弯月面波动加剧,造成卷渣,或对凝固坯壳的冲击过大,使夹杂物及气泡易被凝固壳捕捉等一系列影响连铸顺行和铸坯质量事故。结晶器内的流场状态与结晶器的尺寸,水口参数,拉速等直接有关<sup>[2,5]</sup>。因此,不同工艺条件下结晶器内的流场状态对提高生产稳定性至关重要。

2<sup>#</sup>铸机浇注管线钢时,铸坯尺寸为 220 mm × 1 600 mm,中间包容量 30 t,浸入式水口内径为 98 mm,插入深度为 210 mm。在拉速为 0.8 m/min、水口角度为  $-15^\circ$  工况下,生产稳定,但当拉速到 0.9 ~ 0.95 m/min 时,结晶器表面报警较频繁,且多为窄面热电偶报警。因此可以确定在该 0.9 ~ 0.95 m/min 拉速下,  $-15^\circ$  的水口角度不合理,因此本文以拉速

为 0.8 m/min、水口角度为  $-15^\circ$  工艺下的钢液流动为标准,比较分析拉速为 0.9 m/min,不同水口角度时钢液流动情况,最终确定该拉速下,最佳水口角度。

### 1 结晶器内流场数值模拟模型的建立

#### 1.1 基本方程

本文采用  $k-\varepsilon$  双方程模型来描述结晶器内钢水的湍流流动情况,具体方程见文献[6]。

#### 1.2 基本假设

实际结晶器内钢液的流动是十分复杂的物理过程,受到凝固、振动等多方面因素的影响,但在数值模拟过程中为了提高计算效率,对所研究的问题进行合理的简化和必要的假设:

- (1) 结晶器内钢液流动为粘性不可压缩流动;
- (2) 忽略结晶器内热传递对流场的影响;
- (3) 忽略凝固坯壳对流动的影响;
- (4) 忽略结晶器振动的影响;
- (5) 结晶器内钢液按均相介质处理。

### 1.3 边界条件

鉴于模型的双对称性,取模型的1/4进行计算。

#### (1) 入口边界条件

入口定义在浸入式水口入口处,入口钢水速度根据连铸机拉速和质量守恒计算确定,方向垂直于入口。

#### (2) 对称面

垂直于对称面的速度分量和所有其他各物理量沿对称面法线方向的梯度设为零。

#### (3) 结晶器液面

垂直于液面的速度分量和所有其他各变量沿液面法线方向的梯度设为零。

#### (4) 出口边界条件

出口处为计算域的底部,采用质量边界条件,即出口处与入口处质量守恒。

#### (5) 结晶器壁面

在结晶器壁面处,垂直于结晶器壁面的速度分量为零,而平行于结晶器壁面的分量采用无滑移边界条件,即粘度设为无穷大。在靠近结晶器壁的节点上,平行于结晶器壁面上的分量由壁面函数确定。

## 2 计算结果及分析

本试验计算的工况如表 1。分别计算不同工况下,钢液面流速的变化,窄面中心和宽面中心的坯壳厚度及温度场的变化。

### 2.1 钢液面流速的变化

不同水口倾角下宽面对称面速度云图和速度矢量图分别如图 1 和图 2 所示。由图 1,图 2 可以看出,随着拉速的增大,结晶器内钢液的流速增大。但

表 1 计算工况的拉速和水口角度

Table 1 Casting speed and inclination of nozzle for calculation of process conditions

工况	拉速/( $m \cdot min^{-1}$ )	水口角度/ $^{\circ}$
1(标准)	0.8	-15
2	0.9	-7
3	0.9	-9
4	0.9	-11

在不同倾角下,流场的流态基本相同,随着水口倾角的增加,冲击点的位置下移,上部回流区增大,这有助于减小液面波动,从而减小保护渣的卷入。随着水口下倾角度的增加,射流的冲击强度减弱,冲击深度增加,结晶器下部流动会相对活跃。

为了便于分析,试验比较不同工况下,沿宽度方向距离中心点不同位置的液面流速的变化(图 3)。由图 3 可知,不同水口倾角下的液面流速分布的趋势基本相同,数值不同。以拉速为 0.8 m/min、水口侧孔倾角为  $-15^{\circ}$  的流速曲线为标准线,当距离小于 0.55 m 时,拉速为 0.9 m/min、水口侧孔倾角为  $-11^{\circ}$  和  $-7^{\circ}$  时结晶器内的液面流速与标准线非常接近;水口侧孔倾角为  $-11^{\circ}$  偏离标准线略大于于水口侧孔倾角为  $-7^{\circ}$ 。当距离大于 0.55 m 时,水口侧孔倾角为  $-11^{\circ}$  的流速基本与标准线重合。所以整体分析,拉速为 0.9 m/min、水口侧孔倾角为  $-11^{\circ}$  的液面流速更接近标准线。

### 2.2 宽面凝固坯壳计算

图 4(a,b)为不同工况下,铸坯宽面中心距钢液面不同距离的坯壳厚度和温度的变化。由图 4 可知,随着拉速的增加,宽面坯壳厚度变薄,温度升高。但是对于同一拉速来说,水口角度的变化对宽面坯

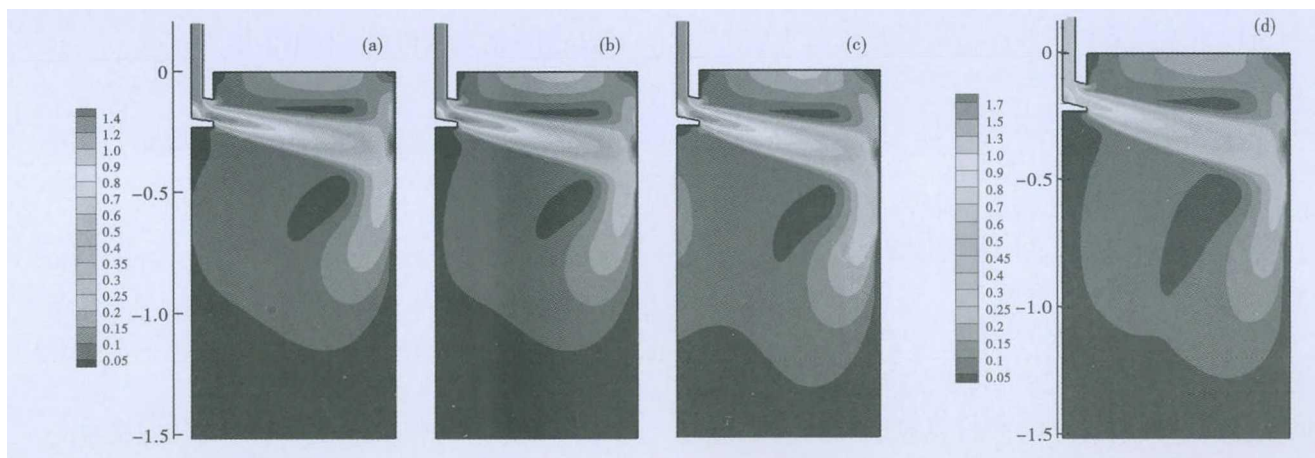


图 1 宽面对称面速度云图,  $V_c$  0.9 m/min, 水口倾角:  $-7^{\circ}$  (a),  $-9^{\circ}$  (b) 和  $-11^{\circ}$  (c);  $V_c$  0.8 m/min, 标准工况水口倾角  $-15^{\circ}$  (d)

Fig.1 Cloud diagram of velocity field of symmetrical face on width,  $V_c$  0.9 m/min, nozzle inclination  $-7^{\circ}$  (a),  $-9^{\circ}$  (b) and  $-11^{\circ}$  (c);  $V_c$  0.8 m/min, criterion process condition, nozzle inclination  $-15^{\circ}$  (d)

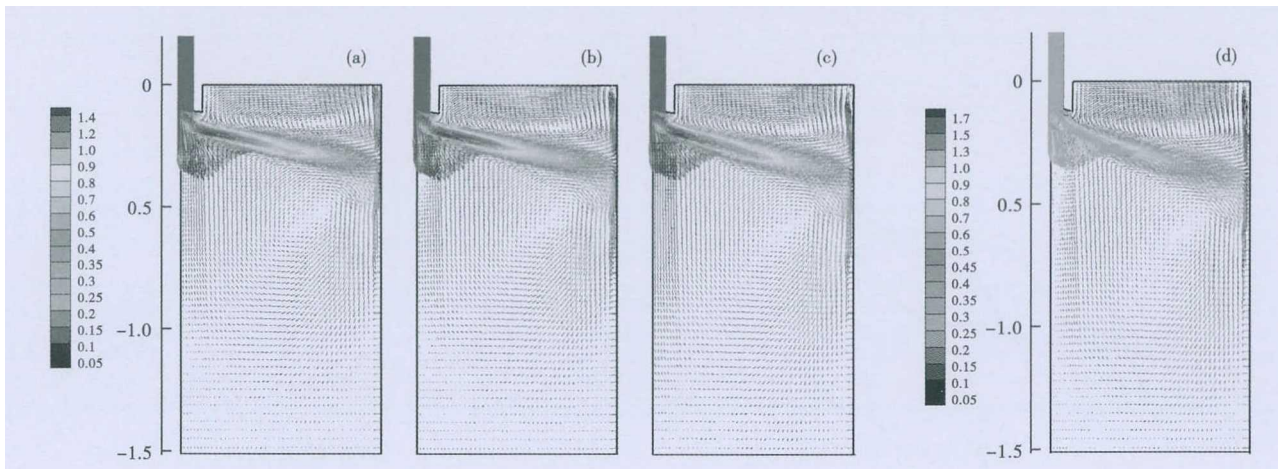


图 2 宽面对称面速度矢量图,  $V_c$  0.9 m/min, 水口倾角:  $-7^\circ$  (a),  $-9^\circ$  (b) 和  $-11^\circ$  (c);  $V_c$  0.8 m/min, 标准工况水口倾角  $-15^\circ$  (d)

Fig. 2 Diagram of velocity vectors of symmetrical face of width,  $V_c$  0.9 m/min, nozzle inclination  $-7^\circ$  (a),  $-9^\circ$  (b) and  $-11^\circ$  (c);  $V_c$  0.8 m/min, criterion process condition, nozzle inclination  $-15^\circ$  (d)

壳厚度和温度基本不存在影响(图 4(a)与(b)中的工况 2,3,4 曲线基本上是重合的)。这说明宽面的流场在这些角度的变化范围内受角度的影响较小, 所以宽面的报警很少。

### 2.3 窄面凝固坯壳计算

图 5(a,b)为不同工况下,铸坯窄面中心距钢液面不同距离的坯壳厚度和温度的变化。由图 5 可知,随着流速的增加,窄面坯壳厚度变薄,温度升高。水口角度对窄面坯壳厚度和温度存在一定的影响。通过与拉速为 0.8 m/min、水口侧孔倾角为  $-15^\circ$  的优化标准曲线对比,拉速为 0.9 m/min、水口侧孔倾角为  $-11^\circ$  时,结晶器内坯壳生长和温度更接近标准曲线。

中,通过生产数据对比发现,优化前的现场生产中结晶器窄面报警频率为 15 次/月,优化后的窄面报警

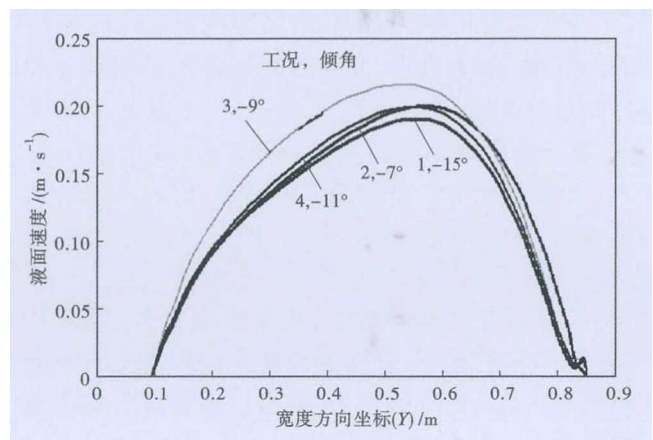


图 3 水口倾角对自由液面速度的影响

Fig. 3 Effect of nozzle inclination on velocity of free liquid surface

### 3 生产应用情况

利用计算的结果将优化后的水口投入现场生产

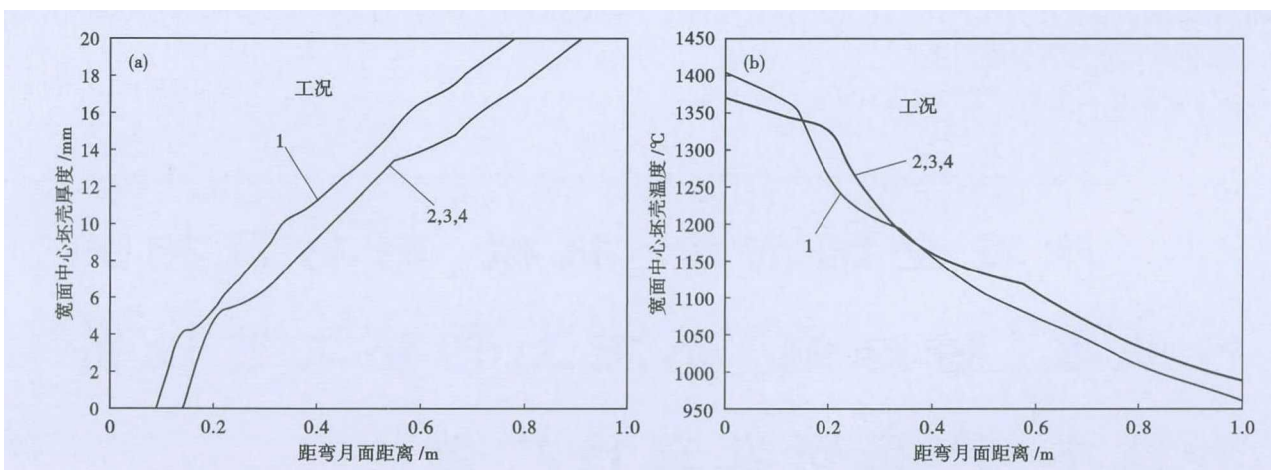


图 4 宽面中心坯壳厚度(a)和温度(b)随距弯月面距离的变化

Fig. 4 Variation of thickness of central shell at width (a) and central temperature of width (b) with distance from meniscus

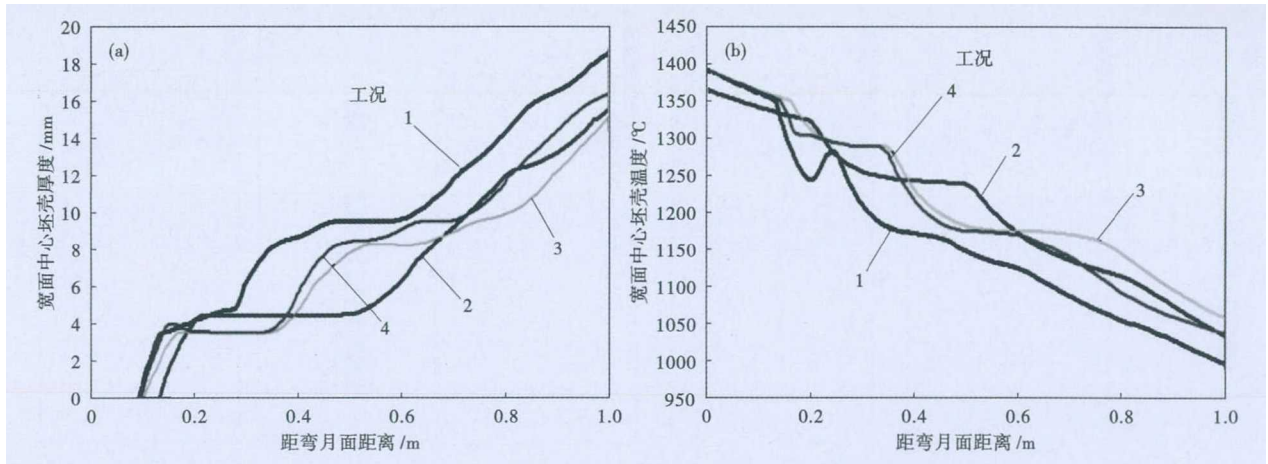


图 5 窄面中心坯壳厚度(a)和温度(b)随距弯月面距离的变化

Fig. 5 Variation of thickness of central shell at narrow (a) and central temperature of narrow (b) with distance from meniscus

频率降到了 0 次/月,大大减低了报警频率,同时对铸坯的表面质量也具有一定的改善作用。

4 结论

(1)随着拉速的增大,结晶器内钢液的流速增大。但在不同倾角下,流场的流态基本相同,随着水口倾角的增加,冲击点的位置下移,上部回流区增大,这有助于减小液面波动,从而减小保护渣的卷入。同时随着水口下倾角度的增加,射流的冲击强度减弱,冲击深度增加,结晶器下部流动会相对活跃。

(2)随着流速的增加,坯壳厚度变薄,温度升高。在同一拉速下,宽面的流场在计算角度的变化范围内受角度的影响较小,但水口角度对窄面坯壳厚度和温度存在一定的影响。

(3)通过对比流速为 0.9 m/min,不同水口角度下,自由液面流速、窄面坯壳厚度和温度分布曲线与标准曲线的偏差,拉速为 0.9 m/min、水口侧孔倾角为 -11°的结果更接近标准曲线。

(4)根据以上分析,当拉速由 0.8 m/min 升到

0.9 m/min时,水口倾角可由 -15°减少到 -11°,将该优化结果应用到现场后大大降低了结晶器窄面的报警率,同时铸坯的表面质量也得到了进一步的改善。

参考文献

- [1] 雷 洪,朱苗勇,邱同榜. 板坯连铸结晶器流场优化[J]. 炼钢, 2000,6(3):29-32.
- [2] 岳 峰,包燕平,刘国林. 板坯连铸机浸入式水口的结构优化[J]. 炼钢,2004, 20(2):51-54.
- [3] 陈 敏,王 楠,韩文习,等. 板坯连铸机浸入式水口结构优化的水模研究[J]. 炼钢,2007,23(3):37-39.
- [4] 张彩军,刘 涛,王 昂,等. 矩形坯结晶器自由液面模拟机水口结构的优化[J]. 钢铁钒钛,2014, 35(2):97-101.
- [5] 张乔英,王书桓,王立涛,等. 浸入式水口底部对板坯结晶器内钢液流场和温度场的影响. 钢铁研究[J],2005,23(1):17-21.
- [6] 毕彦雷,张树江,张彩军. 薄板坯连铸结晶器钢液流动数值模拟[J]. 河南冶金,2011,19(2):22-25.

宁林新(1979-),女,硕士(2004年北京科技大学),高级工程师,2001年北京科技大学(本科)毕业,冶金过程中的数值模拟仿真研究. E-mail:ninglinxin@mail.shougang.com.cn

收稿日期:2017-08-03

**欢迎全国冶金、机械、耐材及相关**  
**行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备**  
**和技术、产品研发宣传广告**