

# 连铸中间包控流装置优化数值模拟研究

韩春鹏, 张胤, 钱静秋, 陈建新

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 针对板坯连铸机的中间包采用商业软件建立三维数学模型, 计算不同中间包控流装置条件下中间包内的流场, 分析不同方案对钢液流动状态和平均停留时间的影响, 分析采用优化方案时钢中夹杂物的情况。结果表明, 中间包控流装置的优化方案与原方案相比中间包的死区体积减少 10.61%, 中间包内开始出现示踪剂时间延长 4.31%, 均有利于中间包内钢液的混合和夹杂物上浮去除, 同时采用优化方案钢中夹杂物水平能够满足生产工艺的要求。

**关键词:** 中间包; 数值模拟; RTD 曲线

中图分类号: TF777

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2022)01-0034-05

## Numerical Simulation Study on Optimizing Flow Control Device of Continuous Casting Tundish

Han Chun-peng, Zhang Yin, Qian Jing-qiu, Chen Jian-xin

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** Three-dimensional mathematical model is established with commercial software aiming at the tundish of slab caster to calculate flow field in tundish with different flow control device conditions of tundish as well as analyze the effects of different schemes on flow condition of molten steel and average retention time and the situations of inclusions in steel with adopting the optimization scheme. The results showed that the volume of dead zone for tundish reduced by 10.61% and the time that tracer appeared in tundish extended by 4.31% comparing the optimization scheme with original scheme, which are all beneficial to mixing molten steel in tundish as well as floating and removal of inclusions. Moreover, the level of inclusions in steel adopting optimization scheme could satisfy the requirements of production technology.

**Key words:** tundish; numerical simulation; RTD curve

中间包内钢液的流动状态和速度分布对钢液成分和温度的均匀性、夹杂物的上浮去除有着重要的影响, 而中间包类型、内部控流装置的结构决定了中间包内流体流动状态、钢液的混合情况、速度分布<sup>[1-2]</sup>。因此通过优化中间包内部结构, 可使夹杂物尽可能上浮, 流动更加稳定, 从而保证铸坯质量,

为生产实际提供理论指导。

采用商业软件建立板坯连铸机中间包的三维数学模型, 计算中间包内部不同控流装置条件下中间包内的流场, 分析不同方案对钢液流动状态和平均停留时间的影响, 从而优化的中间包内部控流装置。

# 1 模型的建立

## 1.1 研究对象

针对包钢板坯连铸机进行研究。连铸机为2机2流,中间包的类型为T型,下底宽1 050 mm,上沿宽1 660 mm,钢水深度为1 000 mm,采用湍流抑制器、挡墙、挡坝的组合控流装置,正常拉速为1.2 m/min,铸坯的断面为1 510 mm×230 mm,浸入式水口内径为80 mm。

## 1.2 控制方程

本文采用 $k-\varepsilon$ 双方程模型来计算中间包内钢流的流动状态。

(1) 连续性方程:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

(2) 动量方程 (Navier—Stokes 方程):

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

(3) 湍动能( $K$ )方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \rho u_i k - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] = G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

(4) 湍动能耗散率( $\varepsilon$ )方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \rho u_i \varepsilon - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] = (C_1 \varepsilon G_k - C_2 \rho \varepsilon^2) / k \quad (4)$$

其中:

$$G_k = \mu_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_l + \mu_t$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

式(1) - (4)中: $u_i, u_j$ 为速度, m/s; $x$ 为坐标值, m; $\rho$ 为流体密度, kg/m<sup>3</sup>; $P$ 为压力, Pa; $\sigma_k$ 为经验常数; $k$ 为湍流动能, m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>; $\varepsilon$ 为湍流动能耗散率, m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>; $\mu_t$ 为湍流黏度系数, kg/(s·m<sup>2</sup>); $\mu_l$ 为层流黏度系数, kg/(s·m<sup>2</sup>); $\mu_{\text{eff}}$ 为有效黏度系数, kg/(s·m<sup>2</sup>); $C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为经验常数,  $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

## 1.3 基本假设

模拟计算过程中采用以下基本假设<sup>[3-5]</sup>:

(1) 忽略中间包表面覆盖剂的影响。

(2) 经过钢包长水口的钢液,其入流速度垂直于中间包自由液面。

(3) 中间包内钢液流动状态为稳态。

(4) 中间包内钢液流动为不可压缩牛顿流体流动。

## 1.4 边界条件

(1) 入口。入口定义在长水口入口处,入口钢水速度根据连铸机不同断面、不同拉速和质量守恒定律进行计算,入口速度为1.77 m/s。

(2) 出口。出口定义在浸入式水口的入口处,采用质量边界条件。

(3) 中间包的自由液面采用自由滑移壁面。

(4) 由于中间包的对称性,计算区域为1/2中间包。在对称面上采用零梯度边界条件。

## 1.5 模拟方案

中间包内设置湍流抑制器、挡墙、挡坝的组合控流装置是应用最普遍的技术,设置湍流抑制器可使钢液在湍流区内充分混合,设置挡墙可有效阻止钢液表面扰动的发展,使钢液表面波动集中在注入流区,而挡坝的设置,可消除钢液沿包底的流动,使流体向上流动,从而有利于钢中夹杂物随着钢液上浮去除,因此挡墙挡坝的配合,可以显著改善中间包内钢液的流动状态。根据双流板坯连铸机中间包的现状,针对湍流抑制器、挡墙、挡坝的结构进行优化。原方案挡墙和挡坝的间距为800 mm,优化方案挡墙和挡坝的间距为500 mm,从而增加了钢液向上的流动速度,有利于减少钢包内的死区体积。

# 2 计算结果与分析

## 2.1 流场计算结果

图1为优化方案中间包内浸入式水口处的流场,图2为优化方案中间包高度方向 $Z=0.5$  m位置处的流场。由图1可知,钢水从钢包流出注入到中间包后,由于入口速度较大,穿透深度较深,直达湍流抑制器,在湍流抑制器内充分混合。钢液从湍流抑制器流出后一部分向挡墙下方流动,另一部分在长水口附近向中间包表面流动,到达液面后沿液面向挡墙方向流去,最后沿挡墙向下流。钢液从挡墙下方流过,由于受到挡坝的阻挡又向上流动,流向中间包的表面,最后向浸入式水口流去。对于采用挡墙挡坝组合的控流中间包,注流区的钢水通过挡墙的下方进入挡墙挡坝之间,从挡墙下方进入的钢水,经过沿包底流动后,碰到挡坝,沿着挡坝向上流动,在挡坝后方形成一个回流,回流速度较大,有利于降低死区体积。通过对比分析,原方案和优化方案的中间包内流场基本相同。

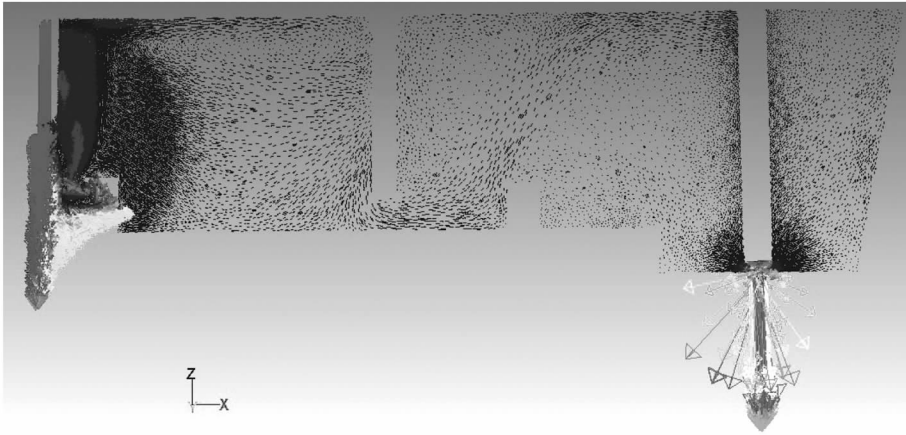
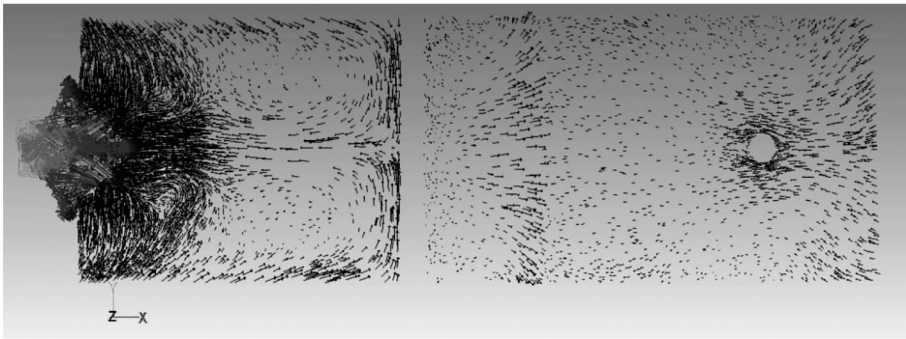


图 1 浸入式水口位置处的流场

图 2  $Z=0.5\text{ m}$  位置的流场

## 2.2 中间包内平均停留时间的计算结果

首先计算得出稳态的中间包流场,然后从入口处瞬时加入一定浓度的示踪剂,计算瞬态的中间包内钢液的流动方程和示踪剂在中间包内的扩散方程,跟踪监测出口处示踪剂的浓度变化,从而得到平均停留时间(RTD)曲线。图 3 为原方案的 RTD 曲线,图 4 为优化方案的 RTD 曲线,通过对 RTD 曲线分析计算死区、混合区、活塞区体积,表 1 为 RTD 分析的结果。

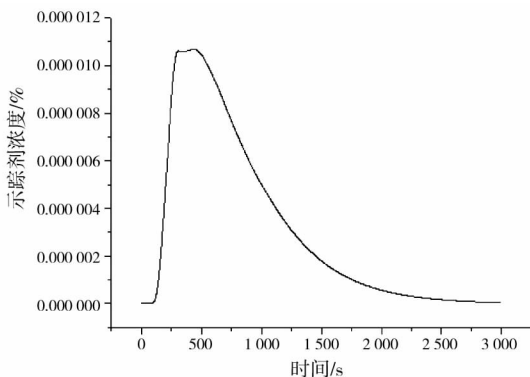


图 3 原方案的 RTD 曲线

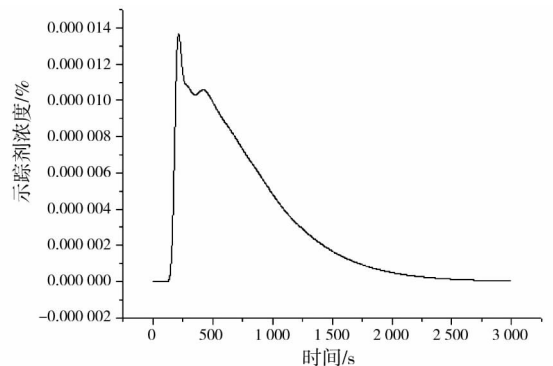


图 4 优化方案的 RTD 曲线

由图 3、图 4 和表 1 可知,对比原方案和优化方案,在挡墙的位置不动、挡坝与挡墙的间距变化时,平均停留时间和死区体积分数基本相同,死区体积( $V_d$ )由 14.80% 降为 13.23%,降低了 10.61%,中间包内开始出现示踪剂时间( $t_{\min}$ )由 116 s 延长为 121 s,延长了 4.31%,最大浓度出现时间( $t_{\text{peak}}$ )由 212 s 延长为 216 s,延长了 1.89%,说明优化方案中间包内的钢液的混合状况较好,有利于夹杂物的聚

集和上浮去除。

表1 原方案和优化方案的 RTD 曲线分析

方案	$V/m^3$	$t_a/s$	$t_{min}/s$	$t_{peak}/s$	$t/s$	$V_d/\%$	$V_p/\%$	$V_m/\%$
原方案	10.040 8	723	116	212	732	14.80	21.68	63.52
优化方案	10.040 8	723	121	216	733	13.23	23.37	63.40

### 2.3 采用优化方案时钢中夹杂物情况

板坯连铸机采用优化方案的中间包内部结构进行生产,取中间包饼样和铸坯样分析试样中的夹杂

物情况,图5为中间包饼样的夹杂物情况,图6为铸坯样的夹杂物情况。

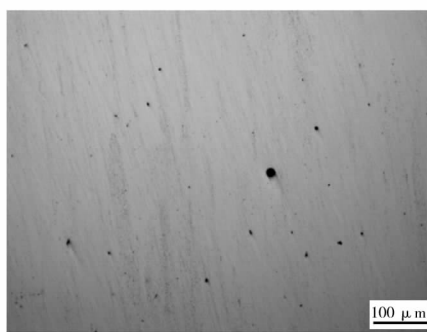
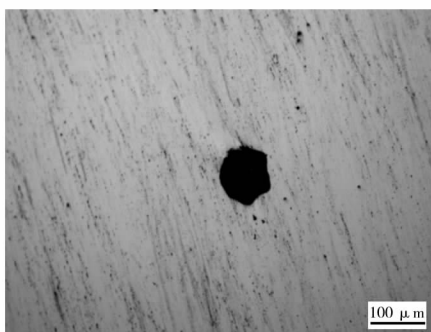


图5 中间包饼样的夹杂物情况

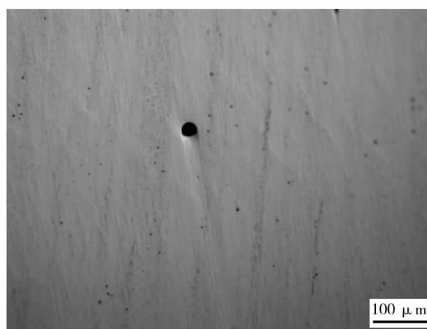
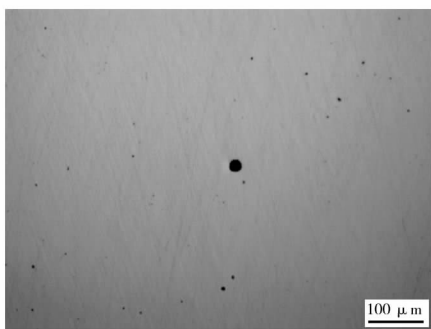


图6 铸坯样的夹杂物情况

由图5可知,中间包饼样中大于 $100\ \mu\text{m}$ 的夹杂物1个, $50\sim 100\ \mu\text{m}$ 的夹杂物2个,同时还有小于 $50\ \mu\text{m}$ 的夹杂物,最大夹杂物尺寸为 $129\ \mu\text{m}$ 。7个铸坯试样中,只有15#试样有二个 $50\ \mu\text{m}$ 左右的夹杂物,其他试样的夹杂物都小于 $50\ \mu\text{m}$ ,见图6;12#试样为内弧试样, $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 的夹杂物共有9个,比其它试样中的夹杂物多;铸坯试样中的大颗粒夹杂物较中间包饼样少,同时夹杂物的数量也明显减少,因此中间包和结晶器对钢水中的大颗粒夹杂物有一定的去除作用。双流板坯连铸机采用优化方案的控流装置能够满足生产工艺的要求。

### 3 结论

(1)中间包内部优化方案(即挡坝向挡墙移近 $300\ \text{mm}$ ,与原方案相比中间包内死区的体积减少 $10.61\%$ ,中间包内开始出现示踪剂时间延长 $4.31\%$ ,均有利于中间包内钢液的混合和夹杂物的上浮去除。

(2)板坯连铸机中间包采用优化方案的内部结构,取样分析铸坯中的夹杂物情况,夹杂物尺寸均小于 $50\ \mu\text{m}$ ,能够满足生产工艺的要求。

## 参 考 文 献

- [1] 刘和平. 基于连续模型的连铸板坯凝固过程传输行为的仿真研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2002.
- [2] 岳强, 杨绪琴. 板坯连铸中间包内钢液流场和浓度场的数值模拟[J]. 安徽工业大学学报, 2012, 29(3): 202-206.
- [3] 梁新腾, 张捷宇, 刘旭峰, 等. 连铸中间包内湍

流控制器控流过程的数值模拟[J]. 上海金属, 2013, 29(3): 49-53.

- [4] 薄凤华, 王凤琴, 张利君. 中间包包型优化的数值模拟及生产应用[J]. 钢铁, 2011, 46(2): 26-29.
- [5] 韩春鹏, 张怀军, 云霞. 6流中间包内部结构优化的数值模拟研究[J]. 包钢科技, 2012, 38(5): 44-46.

(上接第13页)

古界色尔腾山(岩)群中, 特别是含铁石英岩地层, 为直接的找矿标志。

(2) 本区铁矿具有较强的磁性, 该区地层中强磁异常分布范围内是寻找此类型矿床的有利地段, 可做为间接找矿标志。

依据图1磁异常等值线推测, 在矿区西南部位存在小规模异常区, 可圈定为进一步找矿靶区。

## 4 结 束 语

本次研究对矿区内地层、矿体特征、构造以及侵入岩的分布进行了研究, 明确了杨六圪卜矿区铁矿产出于新太古界色尔腾山(岩)群( $Ar_3s$ )东五分子岩组( $Ar_3d$ )角闪斜长片麻岩中, 为沉积变质型磁铁矿。因受矿区范围限制, 在矿区外围及深部工作程度较低, 未能完全控制矿体。在矿深部及外围申请调整矿区范围, 适当投入探矿工作量, 可以扩大矿床

远景。

## 参 考 文 献

- [1] 陈志勇, 郑翻身, 王忠, 等. 内蒙古中西部色尔腾山岩群的厘定及其地质意义[J]. 地质与资源, 2007, 16(1): 1-6, 41.
- [2] 刘利, 张连昌, 代堰镔, 等. 内蒙古固阳绿岩带三合明BIF型铁矿床的形成时代、地球化学特征及地质意义[J]. 矿床地质, 2012, 31(S1): 123-124.
- [3] 李文国. 内蒙古自治区岩石地层[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1996.
- [4] 王佳营, 李志丹, 李光耀, 等. 内蒙古合教BIF型铁矿的形成时代、地球化学特征及地质意义[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 2135-2151.