

· 试验研究 ·

20 t T 型中间包控流装置的模拟和优化

彭家清 白晓路 贺 银

(江苏永联钢铁集团有限公司炼钢总厂, 张家港 215600)

摘 要 用 CFX 流场计算软件模拟对比 20 t T 型中间包 3 种控流装置, 研究导流孔个数、孔径、位置对中间包钢水流场的影响, 得出较合理的控流装置方案。模拟和应用结果表明, 采用两边挡墙设上下导流孔, 中间挡墙设一个导流孔, 中间包内钢水流场、液面和出口流稳定, 钢水温度波动小, 中间包钢水平均停留时间提高至 712 s, 有利于钢水中夹杂物去除。

关键词 20 t T 型中间包 控流装置 模拟分析 钢水停留时间 钢中夹杂物去除

Simulation and Optimization of Flow Control Device in 20 t T-Type Tundish

Peng Jiaqing, Bai Xiaolu and He Ying

(Steelmaking General Plant, Jiangsu Yonglian Iron and Steel Co Ltd, Zhangjiagang 215600)

Abstract The three kinds of flow control device in 20 t T-type tundish have been simulated and compared by using CFX flow field calculation software to study the effect of number of flow guided holes, diameter and position of hole on liquid flow field in tundish, and the suitable scheme of flow control device is gotten. The simulation and application results show that with setting up upper and lower guided flow holes at both sides walls and setting up a guided flow hole at middle wall, the flow field and liquid surface in tundish and the flow at outlet are stable, the fluctuation of temperature of liquid is smaller, and the average residence time of liquid in tundish increases to 721 s being favourable to remove the inclusions in liquid.

Material Index 20 t T-Type Tundish, Flow Control Device, Simulation and Analysis, Residence Time of Liquid, Removal of Inclusions in Steel

江苏永钢 120 t 转炉连铸、高速线材工程包括从康卡斯特引进 8 机 8 流全自动控制方坯连铸机, 成功开发出冷镦钢、弹簧钢、齿轮钢、轴承钢 LX70A、LX80A 帘线钢盘条, 优化了江苏永钢的产品结构。

1 中间包控流装置的设置方案

通过数值模拟, 获得中间包不同设计方案控流装置条件下中间包内钢液的流场信息, 为中间包控流装置的选择提供依据, 再对不同控流装置条件下的中间包钢液流场进行测定和分析, 研究得到合理的控流装置形式, 并对中间包优化控流装置条件下中间包内流场进行分析研究。

利用不可压缩粘性流体力学中的连续性方程、 $N-S$ 方程及 $k-s$ 双方程模型, 建立了描述钢液流动的三维数值模型, 对结晶器内的流场进行计算^[1]。

1.1 中间包主要工艺参数和尺寸

永钢的连铸中间包所采用的主要工艺参数见表 1。

根据国内同类型中间包耐火材料的砌筑经验, 若采用碱性浇注料制作工作层, 则工作层: 永久层: 保温垫的厚度 (mm) 比为 50 : 130 : 20, 厚度为 200 mm, 包底略厚达到 240 mm。由此可以得到没有设置

表 1 连铸中间包的主要工艺参数

Table 1 Main process parameters of tundish for casting

项目	参数
中间包容量/t	20
包型	T 型
流数	4
钢包浇铸温度/℃	1 524 + (15 ~ 40)
钢液面深度/mm	764
溢流液面深度/mm	900
长水口内、外径/mm	60, 120
包底出水口内径/mm	90

控流装置时的中间包内型尺寸, 如图 1 所示。

1.2 中间包中控流装置的尺寸

提出了三种新的导流为挡墙方案。

坝可以控制包底的短路流, 设置于中间包一侧两个出水口连线的中点位置, 高度 300 mm, 厚度 200 mm。塞棒主要用来控制出水口处的漩涡流, 塞棒直径设置为 120 mm, 端部为半球形, 插入液面 560 mm。

2 中间包数学模型描述

2.1 假设条件及边界条件

由文献[2]可得到边界条件为:

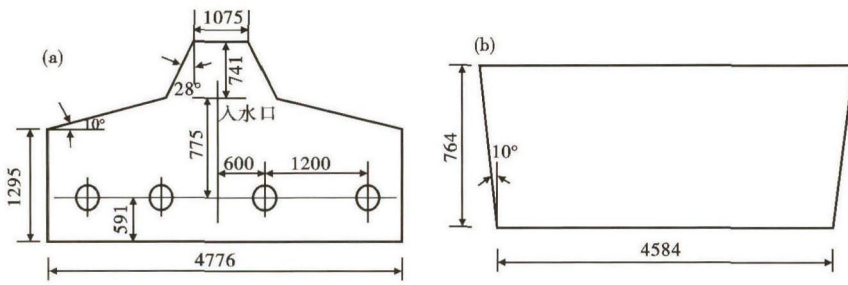


图 1 中间包内衬简图:(a)顶视图;(b)侧视图

Fig. 1 Schematics of tundish lining: (a) top view; (b) side view

- (1) 连铸中间包内钢水的初始温度均匀分布;
- (2) 忽略表面覆盖剂对流动的影响,中间包钢液顶面为自由滑移表面

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = w = 0, k = \varepsilon = 0;$$

- (3) 壁面附近的流动区域粘性效应占优势通过无滑移边界壁面函数法;
- (4) 中间包流体为粘性不可压缩流体且为稳态流动;
- (5) 钢液各参数:密度看作是温度的函数, $\rho = 7000 \text{ kg/m}^3$; 附面层粘度 $0.0062 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$;
- (6) 中间包长水口钢液流速为 1.67 m/s 。

2.2 控制方程

中间包钢液流动为湍流流动,描述钢液的流动由连续性方程;动量方程(N-S方程)以及描述湍流模型能量耗散的 $k-\varepsilon$ 双方程^[3]。

(1) 连续性方程:
$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

(2) 动量守恒方程(N-S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 ε 方程:

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

式中: $G_k = \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$; $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t = \mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; $\mu_i (i = 1, 2, 3)$ 分别为三坐标轴 X、Y、Z 方向

上的速度 μ_x, μ_y, μ_z 。式中: k - 湍流动能/ $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$; ε - 湍动能耗散系数/ $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3})$; μ_t - 湍流粘度系数/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$; μ - 层流粘度系数/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$; 由文献[4]可知: $C_1 = 1.43, C_2 = 1.93, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

2.3 数值模拟计算方案

中间包内控流装置的布置方式、形状尺寸等都会对流动特性产生很大影响,本模拟计算主要设计考察中间包内设置不同的挡墙形式对中间包流动特征的影响。计算方案(图2)为:

- (1) 挡墙方案1,即左右两边挡墙各设一个直

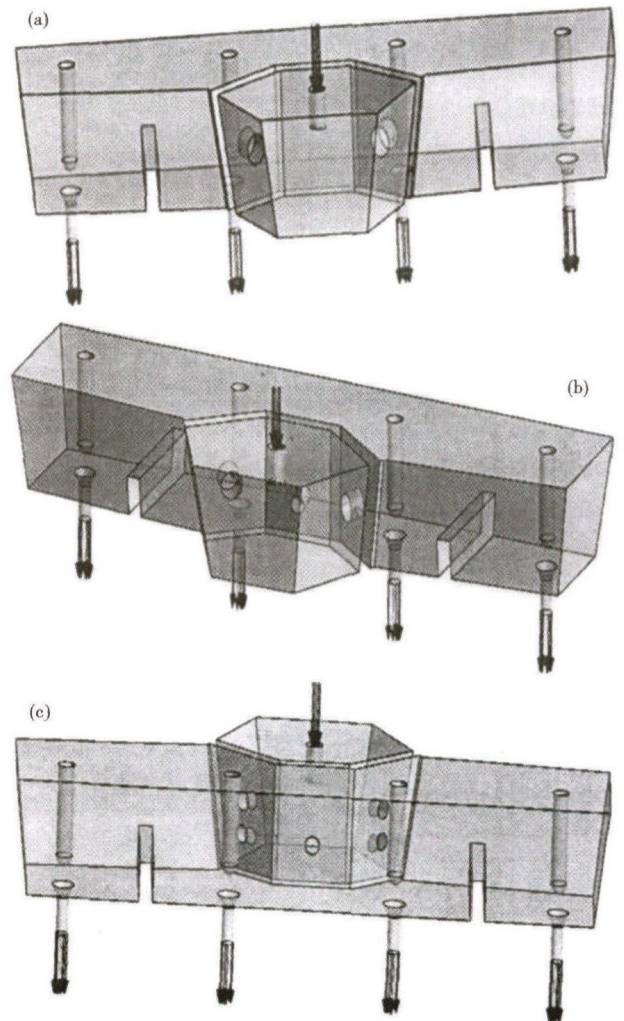


图 2 中间包的三维几何模型:挡墙方案 1(a),方案 2(b)和方案 3(c)

Fig. 2 3 dimension geometric model of tundish: wall scheme No1 (a), scheme No2 (b) and scheme No3 (c)

径 160 mm 的导流孔,孔在冲击区侧的中心高度 300 mm,另一侧的高度 320 mm;

(2)挡墙方案 2,即左右两边挡墙各设两个直径 100 mm 的导流孔,上孔在冲击区侧的中心高度 400 mm,另一侧的高度为 405 mm,下孔在冲击区侧的中心高度 200 mm,另一侧的高度 230 mm;

(3)挡墙方案 3,以挡墙方案 2 为基础并在中间挡墙设一个直径 100 mm 的导流孔,孔在冲击区侧的中心高度 200 mm,另一侧的高度 220 mm。

根据上述方案设计中间包的三维几何模型。

2.4 网格划分

CFX 软件需要对几何模型进行离散并用有限元法计算,所以在设定物理模型前需要设置网格。由于中间包结构比较复杂,所以对模型网格采用分体划分,使用四面体网格。在计算过程中,由于存在误差以及计算设定对物理现象描述的精度问题,较粗的网格可能导致错误的结果,还可能造成计算结果发散;网格较细,计算的机时较长,会浪费大量的时间,模拟的成本也相应增加。

根据中间包的具体几何形状,并经过多次比较计算结果,最后将网格划分为:四面体网格划分尺寸为小于 30 mm,在壁面和出水口处进行优化。

3 试验计算结果与分析

3.1 方案 1 流场

由图 3(a)可以看出,采用方案 1 的中间包挡墙时,因为导流孔深度加大,分流了下部沿包壁高速而来的回流钢液,中间包冲击区内的流速降低,但导流孔距离液面较远,不能影响向液面回流的钢液,因此产生了大回流的现象,使液面受到的扰动加大。同样由于导流孔较深,钢液在导流孔出口处流股较集中,均流向液面,然后向各水口分流,贴底短路流基本消失。由于导流孔与水平面的夹角减小,液流经较长距离才到达液面,动能消弱较大,因此,出口流区液面受扰动的面积增大,但扰动强度显著降低,而且液流影响区域扩大使死区减少,各出水口间的温度差减小。

3.2 方案 2 流场

由图 3(b)可以看出,采用方案 3 的中间包挡墙时,因为两边隔墙设上下两个导流孔加上中间隔墙的一个导流孔,分流了下部沿包壁高速而来的回流钢液,并使钢液在冲击区下部形成回流,使液面回流的钢液流量受较大削弱,因此,使液面受到的扰动区和扰动强度明显减弱。同样由于中间隔墙设了一个

导流孔,钢液在导流孔出口处流股更分散,但基本均流向液面,中间隔墙的导流孔引起少量短路流出现。由于导流孔出口流较分散,出口流区液面受扰动的面积大幅扩大和扰动强度非常微弱,出口流区流场也非常平缓,流速较低。然而,由于少量短路流的出现各出口间钢液可能存在一定温差。

3.3 方案 3 流场

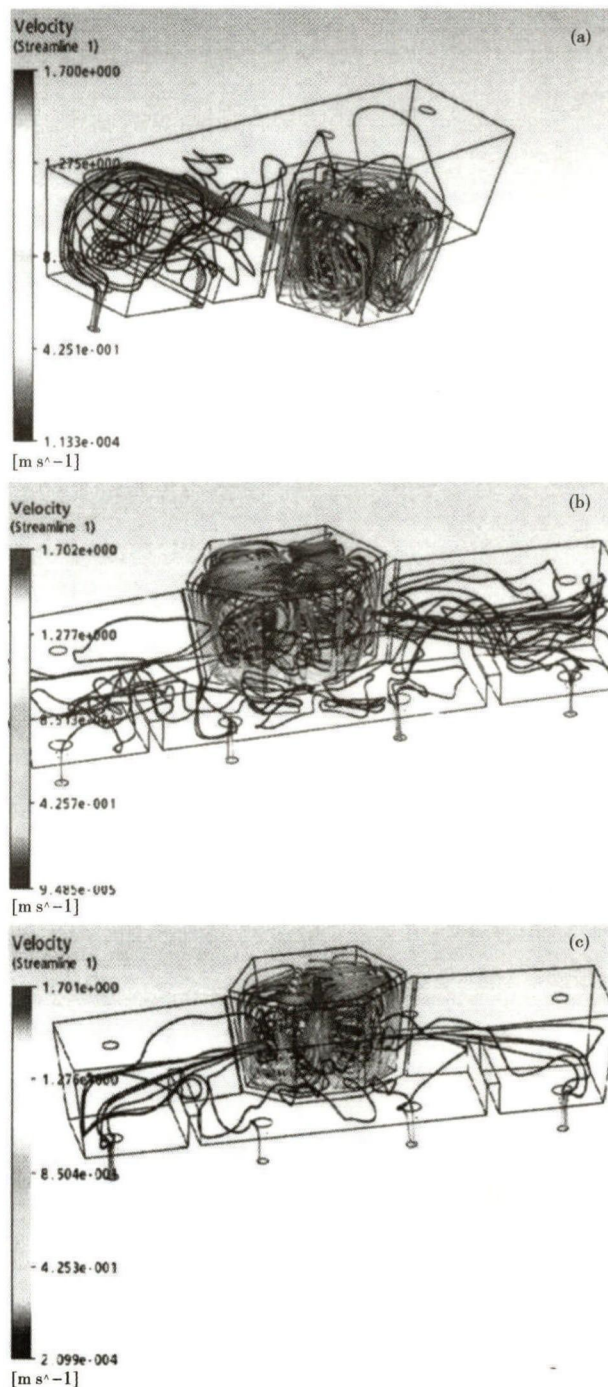


图 3 中间包内流场分布:(a)方案 1;(b)方案 2;(c)方案 3
Fig.3 Distribution of flow field in tundish:(a) scheme No1;
(b) scheme No2 and (c) scheme No3

由图 3(c)可以看出,采用方案 3 的中间包挡墙时,因为两边隔墙设一个大导流孔加上中间隔墙的一个导流孔,分流了下部沿包壁高速而来的回流钢液,并使钢液在包壁的贴壁流加强,使液面回流的钢液流量增大。

4 实际工业应用及效果

4.1 中间包温度稳定性的影响

为验证试验结果的可靠性,对方案进行工业化试验;间隔相同的时间分别 15 次测温,进行中间包温度稳定性的对比研究。

从图 4 中数据可以看出,方案 1、2、3 中钢水温度平均值为 1 515. 13, 1 518. 27, 1 515. 87 °C, 差距不大,但方案 3 中间包温度的波动(用 15 次测温的均方差表示)明显减少,相对方案 1 减少了 37. 5%, 相对方案 2 减少了 51. 6%(方案 1、2、3 测温的均方差分别为 1. 99、2. 57、1. 25)。提高温度的均匀性可以为后续连铸操作稳定及产品质量的提高提供重要的保障。

4.2 中间包钢水停留时间的影响

水模流场分析显示结果可以发现,方案 3 中间包钢水平均停留时间提高到 712 s, 相对方案 1 和方案 2 停留时间增加了 31. 2%。主要原因:方案 3 中间包流场中大回流的现象增强,使液面受到的扰动区和扰动强度增大,可能降低去除夹杂的效率,但还没有达到引起卷渣的速度(能造成卷渣的临界速度为 0. 5 ~ 0. 8 m/s)^[5]。同样由于中间隔墙设了一个导流孔,钢液在导流孔出口处流股较分散,但基本均流向液面,存在少量贴底短路流。由于导流孔出口流较分散,出口流区液面受扰动的面积进一步增大,但扰动强度进一步减低。

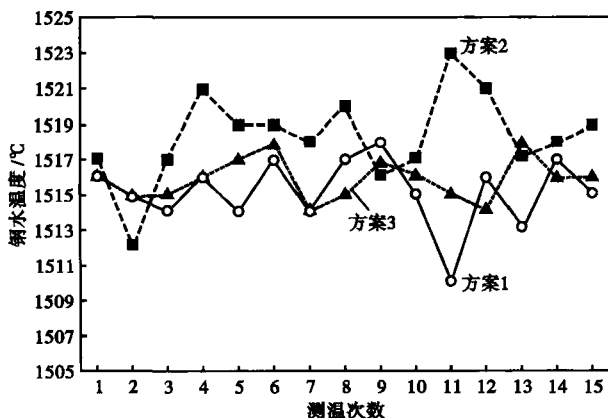


图 4 方案 1、2、3 中间包钢水温度曲线

Fig. 4 Curves of temperature of liquid in tundish with scheme No1, No2 and No3

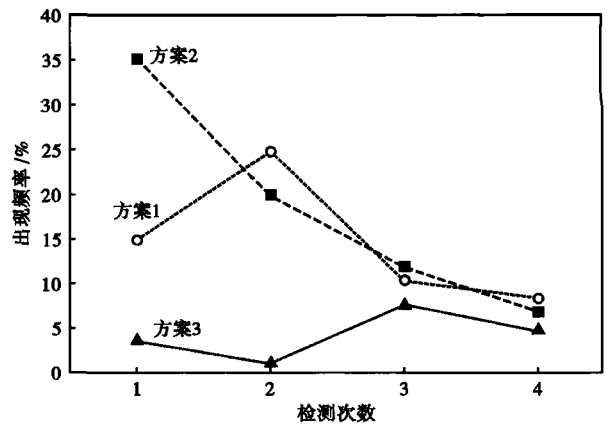


图 5 方案 1、2、3 的夹杂物出现频率对比

Fig. 5 Comparison of occurring rate of inclusions in steel with scheme No1, No2 and No3

4.3 对夹杂物的影响

通过对现场的夹杂物进行检测及统计分析,试验结果如图 5 所示。

方案 3 减少了中间包钢水的扰动强度,提高温度的均匀性,并增加了钢水的停留时间,有利于钢水中夹杂物的上浮,这为后续连铸操作的连续稳定运行以及产品质量的提高提供了重要的保障。

5 结论

(1)采用方案 3(即边挡墙设上下导流孔,中间挡墙设一个导流孔)时,整个中间包内流场较缓和、液面不受扰动,但存在少量短路流且出口处流更加稳定,因此,中间包内选择方案 3 为最优。

(2)从现场中间包温度测量数据分析看,方案 3 有利于提高钢液温度的均匀性。

(3)水模流场分析,方案 3 提高了钢水在中间包的停留时间,达到促进夹杂物上浮的效果。

参考文献

[1] Launder B E, Spalding D B. The Numerical Computation of Turbulent Flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2): 269-289.
 [2] 王小鸣. 钢水中间包冶金技术[J]. 江苏冶金, 1995, 18(6): 5-10.
 [3] 张立峰, 蔡开科. 中间包冶金技术的发展[J]. 炼钢, 1997, 32(4): 9-12.
 [4] 王红娜, 杨亮, 郑宝安, 等. 三流非对称连铸 18 t 中间包流场的物理和数学模拟[J]. 特殊钢, 2014, 35(1): 7-10.
 [5] 曲英, 王利亚. 连铸中间包内钢液流动的数学模型[J]. 化工冶金, 1985, 3(4): 152-157.

彭家清(1976-), 男, 高级工程师, 1999 年包头钢铁学院(本科)毕业, 新产品开发和炼钢工艺研究。

E-mail: pjq1976@163.com

收稿日期: 2016-04-18