

文章编号 :1004 - 9762(2001)01 - 0023 - 04

# 首钢中间包优化设计(I)\*

刘中兴<sup>1,2</sup>, 张捷宇<sup>2,3</sup>, 冯贵军<sup>4</sup>, 贺友多<sup>1</sup>, 刘建辉<sup>5</sup>

(1. 包头钢铁学院 冶金工程研究所, 内蒙古 包头 014010 2. 北京科技大学 冶金学院, 北京 100083 3. 包头钢铁学院 材料与冶金工程系, 内蒙古 包头 014010 4. 包头钢铁公司 烧结厂, 内蒙古 包头 014010 5. 首都钢铁集团公司, 北京 100041)

关键词: 中间包 流场 数值模拟

中图分类号: TF769.2 文献标识码: A

**摘要:** 应用湍流流动数学模型研究了首钢中间包内钢液的流动与混合, 该模型包括求解三维湍流的  $N-S$  方程和  $k-\epsilon$  双方程模型。对首钢第二炼钢厂现有中间包的流场和钢液的停留时间做了模拟与分析, 并预报了在不同位置加设不同高度的坝后, 中间包内钢液的流动状态及停留时间。结果表明, 如果坝的设置不当, 中间包内钢液的流动状态则会更差。

## Optimization design for the continuous casting tundish of Shoudu Iron and Steel Group Co.( I )

LIU Zhong-xing<sup>1,2</sup>, ZHANG Jie-yu<sup>2,3</sup>, FENG Gui-jun<sup>4</sup>, HE You-duo<sup>1</sup>, LIU Jian-hui<sup>5</sup>

(1. Institute of Metallurgical Engineering, UIST Baotou, Baotou 014010, China 2. Metallurgy School, UST Beijing, Beijing 100083, China 3. Department of Material and Metallurgical Engineering, UIST Baotou, Baotou 014010, China 4. Sintering Plant, Baotou Iron and Steel Co., Baotou 014010, China 5. Shoudu Iron and Steel Group Co., Beijing 100041, China)

**Key words:** tundish; flow field; numerical simulation

**Abstract:** The turbulent model was applied to study of the fluid flow and mixing in continuous casting tundishes. The mathematical model involves the solution of the three dimensional turbulent  $N-S$  equation and  $k-\epsilon$  two equation turbulence model. The fluid flow field and residence time have been simulated and analyzed by computer, and the structure of the tundish has been improved. The author only discussed that the dams with different heights were located at the different positions in the tundish. The results show that the properly improved flow fields do better than the old ones and the random location of the dam in the tundish may cause the worse flow field.

连续铸钢技术的迅速发展, 使冶金工作者逐渐认识到中间包不仅是降压稳压保持连铸工艺稳定, 把钢水均匀分配给各个结晶器和实现多炉连浇的中间容器, 而且还起着排除夹杂物纯洁钢液的重要作用。中间包内钢液的流动状态, 对延长钢水在中间包的停留时间, 减少卷渣和改善夹杂物的上浮排出有重要作用, 直接影响到连铸坯的质量。

大包钢水通过中间包和结晶器浇铸成坯, 钢坯的质量很大程度上取决于钢水中外来和内在夹杂的

去除程度。为使钢液中夹杂物充分上浮, 延长中间包钢液的停留时间, 在中间包内横向设置了有间隔的垂直排列挡板, 使钢液在挡板之间回流, 以捕获或截留夹杂物。通过挡板还可以改变钢水流向, 钢水上向流动时, 形成较高的初始速度, 流向覆盖保护渣和钢液界面处, 这样上浮的夹杂物便能被中间包的保护渣所捕获而分离除去<sup>[1]</sup>。

本文针对首钢二炼钢厂的中间包, 用计算机模拟计算了只在中间包内加设 1 个坝, 且其高度及位

\* 收稿日期: 2001-01-08

作者简介: 刘中兴(1963-)男, 河北赵县人, 包头钢铁学院副教授, 北京科技大学博士研究生, 主要从事冶金传输理论与应用研究。

置不同时,钢水的流动状态及停留时间曲线,研究了坝高及位置对中间包设计的影响.

## 1 数学模型<sup>[2,3]</sup>

### 1.1 建立数学模型的根据

设中间包内的钢水流为稳定态,忽略表面渣层的影响,钢水面为自由表面,包内钢水的流动为湍流流动,描述钢水流动的基本微分方程有:

连续性方程:

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

Navier-Stokes 方程:

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

湍流模型采用 Lauder 和 Spalding 的  $k-\epsilon$  双方程来计算.

湍流动能方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i}) = G - \rho \epsilon \quad ; \quad (3)$$

湍流动能耗散方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}) = \frac{C_1 \epsilon G - C_2 \rho \epsilon^2}{k} , \quad (4)$$

其中:

$$G = u_i \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) ,$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_1 + \mu_t , \mu_t = C_D \rho k^2 / \epsilon ,$$

方程所出现的 5 个常数采用 Lauder 和 Spalding 所推荐的数据,即:

$$C_1 = 1.43 , C_2 = 1.93 , C_D = 0.09 , \sigma_k = 1.00 ,$$

$$\sigma_\epsilon = 1.30 .$$

示踪剂浓度方程:

$$\frac{\partial (\rho C)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho C u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho D_{\text{eff}} \frac{\partial C}{\partial x_j}) , \quad (5)$$

式中,  $D_{\text{eff}}$  为示踪剂的有效扩散系数,  $D_{\text{eff}} = D_0 + \frac{\mu_t}{\rho S c_t}$ .

### 1.2 中间包边界条件的处理

在自由表面上和对称表面上,所有的变量梯度为零,自由表面上  $z$  方向速度  $w = 0$ . 在入口流股处,假设钢水的流动为一维流动,流股的速度方向垂直于自由表面,速度的大小由拉坯速度计算求得,并且假定入口断面上的速度是均匀分布的. 在中间包出口处,未做假设数据.

在靠近固体墙的区域内,钢水流的参数变化比内部大得多,所以,在这部分区域里,采用边界层理论来处理速度  $u, v, w$  和  $k, \epsilon$ ,同时在与固体墙相接触的格点上,采用无滑移边界条件.

### 1.3 数值计算程序

将式(1)~(5)用有限差分法离散为线性方程组,然后用 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) 法求解差分方程组.

首钢二炼钢厂的中间包四周均为倾斜墙,且其倾角不同,单进口单出口,包底受钢水处高于水口区. 中间包的形状是进口处一端大,小的一端为水口区. 整个中间包关于进口及水口的连线对称,故取中间包的 1/2 为计算区域. 计算空间如下: 中间包长度方向,设为  $x$  方向,取 55 格点; 宽度方向,设为  $y$  方向,取 24 格点; 高度方向,设为  $z$  方向,取 15 格点.

中间包三维流场的计算机程序采用 Fortran 语言编写,在微型机上运行.

### 1.4 数值模拟方案

中间包内坝的设计参数是决定钢液中夹杂物含量的主要参数. 根据首钢第二炼钢厂提供的条件,采用计算机模拟的方法给出中间包内坝的优化设计参数. 具体内容如下:

(1) 先模拟计算未加坝的中间包内钢液的流动状态;

(2) 在中间包内加设坝,且坝处于不同位置及不同高度时,中间包内钢液的流动状态.

计算机模拟方案见表 1.

表 1 中间包设计计算机模拟方案

Table 1 Scheme of the computer simulation for the tundish design

拉速/(m·min <sup>-1</sup> )	0.5	0.6	0.7	0.8
铸坯断面/(m×m)	$1.4 \times 0.22$	$1.54 \times 0.22$		
坝	0.31	0.37	0.43	
水平位置/m	0.95	1.63	1.73	

## 2 计算机模拟结果

图 1(a)~(c) 为未加挡板中间包及只加 1 个挡板中间包的三维流场的数值计算结果——分断面绘制的  $xz$  截面的流场图. 图 1 中给出了各断面在坐标系中的实际位置.

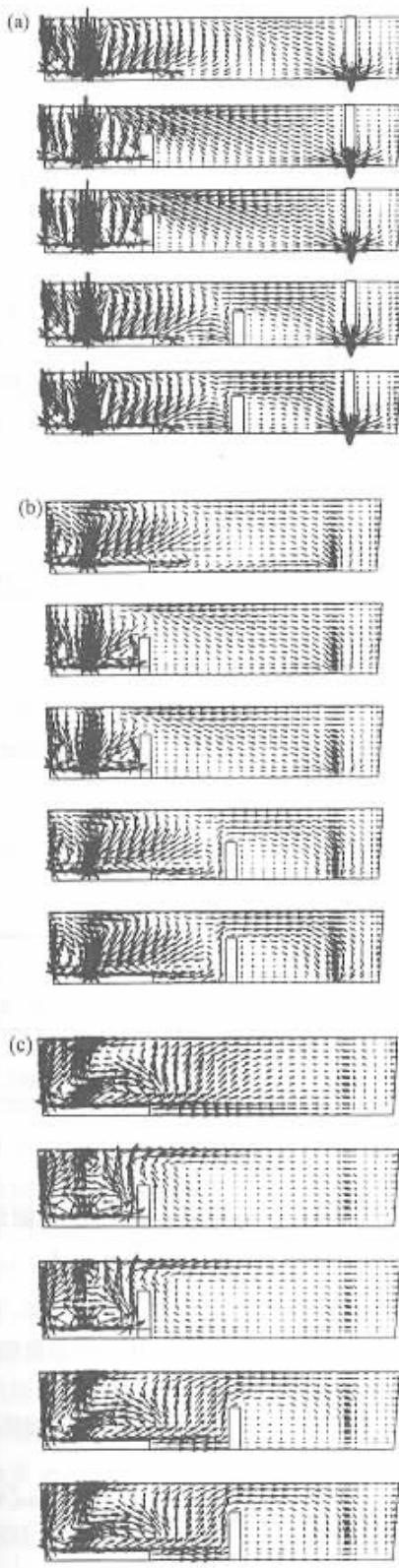
图 1 中间包内钢水的速度分布( $x-z$  截面)

Fig.1 Velocity distribution of molten steel in the tundish  
 (a) 距中间包中心截面  $y = 0.015 \text{ m}$  处 (b) 距中间包中心  
 $y = 0.19 \text{ m}$  截面 (c) 距中间包中心截面  $y = 0.34 \text{ m}$  处

图 2 为由式(5)计算得到的示踪剂在出口处的浓度分布曲线,即停留时间分布曲线。

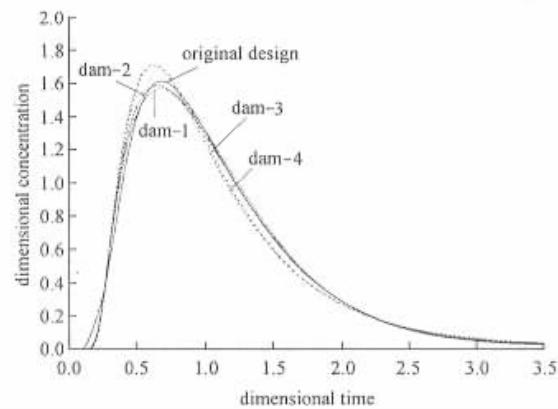


图 2 停留时间分布曲线(只加一个坝)

Fig.2 Distribution curve of residence time

图 1~2 中的符号说明见表 2.

表 2 符号说明表

Table 2 The illustration of symbol

中 间 包	坝	
	高 度 /m	水平方向位置 (距进口侧墙的距离)/m
Original Design	-	-
Dam - 1	0.37	0.95
Dam - 2	0.43	0.95
Dam - 3	0.37	1.73
Dam - 4	0.43	1.73

注: Original Design 为未加设任何挡板的中间包; Dam 为加设 1 个挡板(坝)的中间包。

### 3 结果讨论

#### 3.1 未加设任何挡板的中间包内钢液的流动方式

由图 1(a)~(c)可知,钢水在入口流股处直冲包底,然后向四方散开,在入口流股与中间包大头侧墙间形成了 1 个循环区,同时由于入口流股的卷吸使其周围的钢水均向下流动,亦使沿侧墙向上流动的钢水向中间包的对称轴线汇聚,然后流向出口区。沿中间包包底流向出口区的钢水在流到中部区域时分成 2 股:一股流向出口形成了短路流,一股向上流动。这股向上流动的钢水在由侧墙返回的钢水的作用下,又分为 2 叉:一部分流向出口,另一部分返回入口区,形成了 2 个循环区。

同时由图1(a)~(c)亦可看出,在出口区不存在相对稳定的层状流动区,这不利于夹杂物上浮,同时对连铸机的稳定操作有不利影响。这是由于钢水由入口直冲到出口,使入口流股流量改变,从而直接影响到出口钢水的状态。

由图1(a)~(c)还可看出,未加挡板时中间包内钢液流动基本上可分为2个区域,一个区域是钢水流向出口,另一个区域是钢水流向入口流股,同时沿侧墙的钢液均流向出口。

总之,未加挡板的中间包,由于入口流股与出口流股的共同作用,钢液在中间包内的流动状态为:直流到出口的钢液比例大,停留时间短,且未形成相对平稳的层状流,不利于夹杂物上浮。

### 3.2 加设1个挡板的中间包内钢液的流动方式

由图1(a)~(c)可以看出,加设1个挡板后基本上把中间包内钢液的流动分成了2个区域,以挡板为界,在挡板外,基本流向为流体越过挡板流向出口,在挡板后形成了1个循环区,且随着 $y$ 的增大循环区也增大。靠近侧墙处钢水的流动相对平静、缓

慢一些,形成了一些层状流动,但由于出口流股的带动,中间部分的钢液流速较大;在大包水口附近,挡板之内的钢液由于大包注流的冲击形成了速度高、卷吸严重的区域。

图1(a)~(c)给出了入口流股外中间包内钢液的流动方式,基本上以循环回流的方式流动。在大包射流区,由于注入流股的卷吸,使得流股周围的钢液也向下流动,随着向下的流股,共同下落直冲包底,钢液到达中间包包底后,流股仍有相当大的动能,因受包底的阻挡,流股迅速沿包底水平方向呈放射状散开,散开的钢液碰到侧墙及挡板后,由于阻挡,流股转而向上。碰到挡板的钢液分成2段:一股越过挡板进入了下1个区域,另一股产生了1个向上的回流。

由图1(a)~(c)及表3可知,不同位置设置的挡板产生了不同的流动状态。Dam-2强行将大量钢水分流到下1个区域,更加缩短了平均停留时间,这是比不加挡板还差的方案;而Dam-3改善了出口区的流动状态,形成了相对平稳的层状流动区,有利于夹杂物上浮,这是所希望得到的结果。

表3 不同中间包设计方案的钢液停留时间分布曲线参数

Table 3 The RTD parameters of the different tundish designs

参 数	中间包设计方案				
	Origina design	Dam - 1	Dam - 2	Dam - 3	Dam - 4
活塞区体积分数	0.396	0.403	0.393	0.424	0.408
混合区体积分数	0.604	0.597	0.607	0.576	0.592

为提高夹杂物在中间包内的去除速度,就要求中间包内有1个较大的活塞区,若从有利于夹杂物聚合的角度看,要求有一定的混合区;另外很重要的点是要有流向表面的流动,这有利于夹杂物被保护渣层吸收。

### 3.3 拉速及铸坯断面变化的影响

拉速及铸坯断面变化只改变进口流股的速度,而进口流股的速度只要在一点范围内的变化,它不影响中间包内钢水流动的基本方式,故改变拉速及铸坯断面(见表4) 稳态流场不变。

## 4 结论

如果挡板设置不当,中间包内钢液不能形成相对平稳的层状流动区,不利于夹杂物上浮。

### 参考文献:

- [1] 贺友多 Sahai Y. 不同因素对连铸机中间包流场的影响 [J]. 金属学报, 1989, 25(4):B272-276.
- [2] 贺友多. 传输过程的数值方法[M]. 北京:冶金工业出版社, 1991.
- [3] Patankar S V. Numerical heat transfer and fluid flow[M]. New York: Mc Graw-Hill, 1980.