

## 气幕挡墙中间包钢水流动的数值模拟

张美杰 汪厚植 黄 奥 顾华志 刘定群

(武汉科技大学湖北省耐火材料与高温陶瓷重点实验室, 武汉 430081)

**摘 要** 根据二流连铸 1 500 mm × 250 mm 板坯时中间包的操作工艺参数, 采用欧拉两流体模型, 多孔介质模型和拉格朗日随机轨道模型, 模拟计算了采用湍流控制器和气幕挡墙技术的中间包内钢液流动特性和夹杂物的运动轨迹, 并用 Monte-Carlo 法统计了夹杂物的总去除率。模拟结果表明, 采用中间包气幕挡墙技术可以有效改善钢液的流动特性, 延长钢液停留时间, 减小死区体积; 当吹气量为 0.90 m<sup>3</sup>/h 时, 夹杂物去除率比不吹气工艺增加 15.6%。

**关键词** 中间包 气幕挡墙 精炼 数值模拟

## Numerical Simulation of Molten Steel Flow in Tundish with Gas Curtain

Zhang Meijie, Wang Houzhi, Huang Ao, Gu Huazhi and Liu Dingqun

(Hubei Province Key Laboratory of Refractories and Ceramics, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

**Abstract** Based on operation process parameters of tundish for two strand concasting 1 500 mm × 250 mm slab, using Eulerian multiphase model, porous media model and Lagrangian random-trajectory model, the characteristics of molten steel flow and inclusion moving trace in tundish with turbulence inhibitor and gas blowing curtain technology have been simulated mathematically, and the total removal ratio of inclusion in steel was calculated statistically by Monte-Carlo method. The simulation results showed that the technology of gas curtain was available to effectively improve the feature of molten steel flow and prolong residence time of molten steel, reduce the volume of dead zone; and as gas blowing rate was 0.90 m<sup>3</sup>/h the removal ratio of inclusion increased by 15.6% compared that with non-gas blowing.

**Material Index** Tundish, Gas Curtain Dam, Refining, Numerical Simulation

在超纯净钢精炼中, 要去除 50 μm 以下的非金属夹杂物, 必须采取更为有效的中间包冶金技术。Wang Laihua 等<sup>[1]</sup>研究了气泡去除夹杂物的机理, 认为在中间包底部吹入气体, 在中间包内形成气幕挡墙, 不仅可以改变钢液的流动特性, 而且气泡在运动的过程中吸附夹杂物并一起上浮, 可以有效促进小于 50 μm 夹杂物的去除, 在超纯净钢的精炼中具有重要作用。

本实验根据实际中间包的操作工艺参数, 首次考虑了吹气元件对吹气参数的影响, 引入多孔介质模型模拟气体在吹气元件中的流动, 用数值模拟的方法, 研究了中间包气幕挡墙技术对中间包内钢液流场以及夹杂物去除率的影响。

### 1 数学模型

#### 1.1 控制方程

利用水模实验结合数值模拟研究<sup>[2]</sup>得出, 欧拉两流体模型可用于描述中间包内钢液及气体的流动。因此, 采用欧拉两流体模型描述中间包内

的气液两相流动, 其中钢液为主相, 气体为第二相。对每一相认为是三维稳定的湍流流动。描述两相流的基本方程包括液相和气相的连续性方程、动量方程以及示踪剂的传质方程<sup>[2,3]</sup>; 夹杂物的运动则采用拉格朗日随机轨道模型<sup>[4]</sup>, 以瞬时流场为载体, 由 BBO 方程描述。

#### 1.2 边界条件

(1) 在金属-渣界面, 看作自由液面近似处理, 夹杂物上浮到渣面即被吸附;

(2) 固体壁面看作无滑移边界, 靠近壁面处的边界层内, 采用标准的壁函数进行处理;

(3) 在钢液的入口及出口处, 假定在整个截面上速度均匀分布, 并根据拉坯速度与铸坯尺寸, 由连续性方程求出, 入口处的湍动能和湍动能耗散率根据经验公式求解<sup>[3]</sup>;

(4) 气体入口处, 氩气通过多孔透气砖吹入中间包, 把氩气在多孔透气砖中的流动看作多孔介质进行处理<sup>[5]</sup>, 假设气泡为球形, 在中间包内气

泡大小不随着位置的改变而发生变化,气泡的初始直径为 2 mm<sup>[6,7]</sup>。

### 1.3 计算条件

以实际二流板坯中间包为计算模型,其结构如图 1 所示。中间包侧壁为倾斜壁,钢包长水口下方设有湍流控制器,长水口和浸入式水口的内径分别为 100 mm 和 94 mm,其中长水口插入液面下 200 mm。铸坯尺寸为 1 500 mm × 250 mm,拉坯速度为 1.2 m/min。在固体壁面及自由表面采用无滑移边界。钢液入口速度根据连铸机的拉速和铸坯断面尺寸确定,并假定为常数。

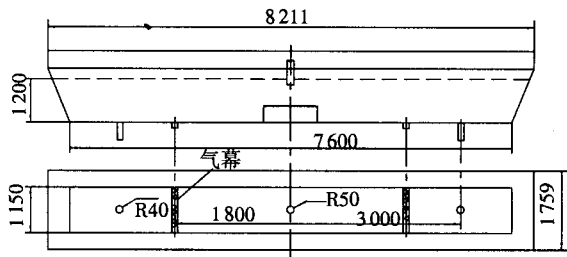


图 1 钢厂中间包结构示意图

Fig.1 Schematic of structure of tundish in steelmaking shop

## 2 网格划分与求解

采用正交法划分 6 面体网格。为了保证计算的精度并加快收敛的速度,在入口、出口及靠近壁面处网格划分密些,总网格数 590 000。采用 SIM- PLEC 法,利用 CFD 商业软件求解各方程。得到稳定的流场后,在钢液入口处瞬态加入示踪剂,求解瞬态的三维湍流扩散方程,求出钢液在中间包内的停留时间分布(RTD)曲线。小于 100 μm 的非金属夹杂物颗粒的去除和中间包内钢液的流动特性有关<sup>[8]</sup>,因此主要模拟研究 20 ~ 100 μm 夹杂物的运动情况。在得到稳定的流场后,从入口截面上随机释放夹杂物颗粒,当它到达液面或被壁面吸附或到达出口,计算终止。一次计算相当于一次实验,一条轨迹形成一个样本。按同样方法,对同一夹杂物重复模拟,得到多个轨迹或样本,统计轨迹的去向,得到该夹杂物的去除效率。

## 3 结果与讨论

由于该中间包结构对称,取其 1/2 轴对称截面进行分析。

### 3.1 吹气对钢液流动特性的影响

图2(a)和(b)分别表示没有气幕装置的中间

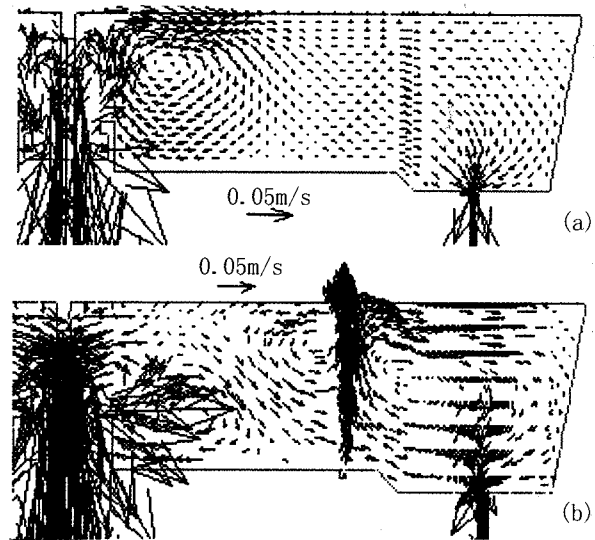


图 2 无底部吹气(a)和底部吹气(b)时中间包内钢液流动速度场

Fig.2 Velocity field of molten steel in tundish without (a) and with (b) gas blowing at bottom

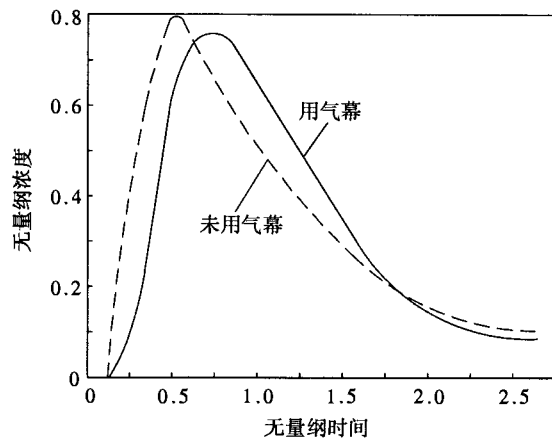


图 3 有、无气幕时钢液停留时间分布(RTD)曲线图

Fig.3 Residence time distribution (RTD) curves of molten steel with and without gas curtain

包及吹气量为 0.90 m<sup>3</sup>/h 的中间包内钢液在沿着长度方向中心截面的速度矢量图。图 3 为 2 种情况下的 RTD 曲线图,表 1 为对 RTD 曲线的分析。

由表 1 及图 2(a)可以看到,在无气幕挡墙的中间包内,钢液以较大的速度从钢包冲击到湍流

表 1 有、无气幕时钢液 RTD 曲线分析

Table 1 Analysis on RTD curves of molten steel without and with bottom gas blowing

透气砖与入口 中心间距/mm	$t_{min}/$ s	$t_{peak}/$ s	$t_{av}/$ s	$V_d/$ %	$V_p/$ %	$V_m/$ %	$V_p/$ $V_d$
-	70	423	790	23.00	32.28	44.73	1.40
1 800	90	588	852	13.28	44.31	42.41	3.34

控制器中,在注入区两侧形成较大的环流,最后经出口流出,其最短停留时间仅 70 s。采用气幕挡墙技术,如图 2(b)所示,由于吹入的气泡在中间包内形成了气幕层,改变了钢液的流动方向,消除了短路流,其最短停留时间较未采用时延长了 20 s,平均停留时间延长 62 s。由于钢液和气泡之间的相互作用,形成剪切流,且在气幕墙的两侧分别形成了两个方向相反的回流区,增加了该区域钢液的混合程度,有效降低了死区体积。

### 3.2 夹杂物运动轨迹及去除率

图 4 表示湍流控制器中间包以及湍流控制器结合气幕挡墙中间包内夹杂物运动轨迹图,气幕挡墙对中间包内夹杂物的去除率的影响如表 2 所示。

由表 2 及图 4(a)可知,在只有湍流控制器的中间包内,20 ~ 100  $\mu\text{m}$  的夹杂物的去除率为 64.3%。夹杂物随着钢液流出湍流控制器后上浮

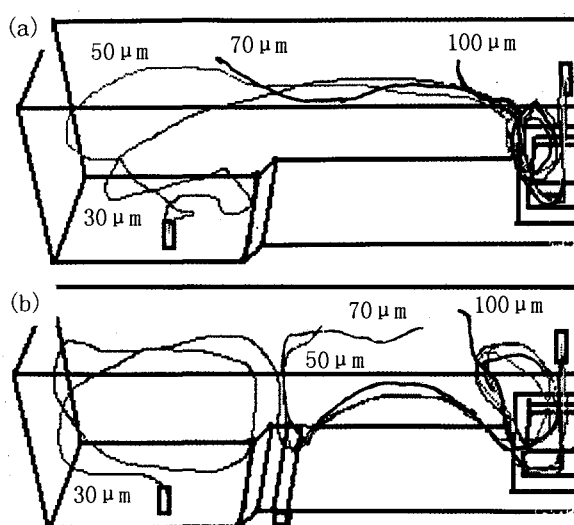


图 4 无(a)和有(b)底部吹气过程中间包钢液内夹杂物的运动轨迹

Fig.4 Moving trace of inclusion in molten steel of tundish without (a) and with (b) bottom gas blowing

表 2 有无气幕时钢液中不同尺寸的夹杂物去除率

Table 2 Removing ratio of inclusions with different sizes in molten steel without and with bottom gas blowing

吹气量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	不同尺寸夹杂物去除率/%									总去除率/ %
	20/ $\mu\text{m}$	30/ $\mu\text{m}$	40/ $\mu\text{m}$	50/ $\mu\text{m}$	60/ $\mu\text{m}$	70/ $\mu\text{m}$	80/ $\mu\text{m}$	90/ $\mu\text{m}$	100/ $\mu\text{m}$	
无吹气	27.1	39.0	50.3	55.0	62.4	76.8	86.7	89.2	92.5	64.3
0.79	56.9	58.3	65.2	67.1	73.3	80.0	88.3	92.5	94.6	75.1
0.90	59.2	65.0	70.0	75.0	82.5	85.8	89.1	93.3	99.1	79.9
1.13	61.4	68.2	69.7	72.5	76.8	82.8	89.6	92.8	96.7	78.9

运动,一部分不能到达端部而流向出口。由表 2 及图 4(b)可知,当采用气幕挡墙技术后,所有尺寸夹杂物的去除率均增加,且随着夹杂物尺寸的减小,气幕挡墙对夹杂物去除率的影响显著增加,因此气幕挡墙技术主要是促进了微小夹杂物的去除。随着吹气量的变化,夹杂物的去除率发生变化,当吹气量为 0.90  $\text{m}^3/\text{h}$  时,夹杂物去除率最高,比不吹气时增加了 15.6%。

## 4 结论

(1) 采用中间包气幕挡墙技术可以有效改善钢液的流动特性,消除短路流,延长停留时间,减小死区体积。

(2) 采用中间包气幕挡墙技术,可以有效促进小颗粒夹杂物的去除。且吹气量影响夹杂物的去除效果。

国家科技攻关计划项目(2005BA325C),省部共建国家重点实验室基金资助项目(J30411)

## 参考文献

- Laihua Wang, Hae-Geon Lee, Peter Hayes. A New Approach to Molten Steel Refining Using Fine Gas Bubbles. ISIJ International, 1996, 36(1):17
- Ramos-banderas A, Morales R D. Mathematical Simulation and Modeling of Steel Flow with Gas Bubbling in Trough Type Tundish. ISIJ International, 2003, 43(5):653
- 王建军,包燕平,曲英.中间包冶金学.北京:冶金工业出版社,2001:115
- 张邦文,李保卫,刘中兴.连铸中间包中夹杂物聚合与去除的数学模型.包头钢铁学院学报,2004,40(2):623
- Ergun S. Fluid Flow through Packed Columns. Chem. Eng. Prog., 1952, 48(2):89
- 王彪.连铸中间包控流装置模拟优化研究.沈阳:东北大学[硕士学位论文],2003:55
- Hua Bai. Argon Bubble Behavior in Slide-Gate Tundish Nozzles during Continuous Casting of Steel Slabs. Dr. thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, 2000
- Lifeng Zhang, Taniguchi S. Fundamentals of Inclusion Removal From Liquid Steel by Bubble Flotation. International Materials Reviews, 2000, 45(2):59

张美杰(1972-),女,讲师,博士生,2001年武汉科技大学硕士毕业,从事冶炼传输理论模拟研究。

收稿日期:2005-09-10