

六流小方坯中间包气幕挡墙的数学模拟

黄 奥 张美杰 顾华志 汪厚植

(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 6 流 200 mm × 200 mm 方坯 30 t 中间包的结构操作工艺参数, 采用欧拉两流体模型、多孔介质模型、欧拉-拉格朗日随机轨道模型及 Monte-Carlo 法, 并引入气泡吸附模型, 用数学模拟法对比研究了采用气幕挡墙技术对 6 流中间包内钢液流动特性及夹杂物去除的影响。结果表明, 采用气幕挡墙技术优化后, 可以有效改善钢液的流动状态, 均衡各出口停留时间, 有效延长钢液的平均停留时间, 降低死区体积, 提高夹杂物去除率, 适应多流中间包超纯净钢冶炼的需求。

关键词 中间包 气幕挡墙 夹杂物 超纯净 数学模拟

Mathematical Simulation on Tundish with Gas Curtain for Six-Strand Billet Concasting

Huang Ao, Zhang Mejie, Gu Huazhi and Wang Houzhi

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

Abstract Based on the structure and operation parameters of an 30 t tundish for 6-strand 200 mm × 200 mm billet concasting, the effect of gas curtain technology on liquid steel flow characteristics and removal rate of inclusion in tundish with 6-strand has been studied by mathematical simulation using Eulerian multiphase model, porous media model, Eulerian-Lagrangian Model and Monte-Carlo method with introduce bubble absorption model. Results indicate that with adopting optimum gas curtain technology, it is available to improve liquid steel flow condition, balance residence time at each exit, prolong average residence time of liquid steel, decrease dead zone volume and increase remove rate of inclusion, and meet requirement of steelmaking for ultra-purity steel in tundish for multi-strand concasting.

Material Index Tundish, Gas Curtain, Inclusion, Ultra-Purity, Mathematical Simulation

由于 6 流小方坯连铸机中间包的 6 个水口至钢包注点的距离相差很大, 不能有效地把钢包注入的钢水均匀地分配给各个结晶器, 因而造成中间包近端和远端水口因钢水温降太大而冻结, 而且夹杂物去除不理想。为使每个水口处的钢水平均停留时间和温度基本保持一致, 确保 6 流连铸机的正常操作以及超纯净钢冶炼, 根据钢厂实际中间包的操作工艺参数, 对 6 机 6 流中间包采用气幕挡墙技术优化, 经过水模型对比验证的数学模型^[1] 进行模拟研究。

1 数学模型与计算方案

本文采用欧拉-欧拉两流体模型描述中间包内的气液两相流动, 其中钢液作为主相, 气体作为第 2 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、湍动能方程及湍动能耗散率方程^[2]。示踪剂在钢液中的湍流扩散方程、夹杂物的轨迹及去除率计算和边界条件参见文献[3~6]。

以钢厂 6 机 6 流小方坯中间包为计算模型, 其结构及气幕挡墙安装如图 1 所示。气量适中选取

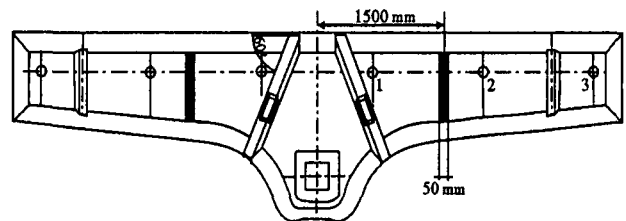


图 1 多流连铸气幕挡墙中间包结构示意图

Fig. 1 Schematic of structure of tundish with gas curtain for multiple-strand concasting

0.9 m³/h^[6], 中间包容量为 30 t, 铸坯尺寸为 200 mm × 200 mm, 拉速为 2 m/min, 其侧壁为倾斜壁, 钢包长水口下方设有湍流控制器, 两边设有斜孔挡墙。

2 网格划分与求解

采用正交法划分 6 面体网格。总网格数 590 000。采用 SIMPLEC 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, 可求出钢液在中间包内的停留时间分布 (RTD) 曲线。根据各 RTD 曲线, 可以分析得到各流最短停留时间即响应时间 t_{\min} 、出口示踪剂浓度达到最大值的时间

t_{peak} , 平均停留时间 t_{av} , 以及整个中间包钢液平均停留时间 T_{av} , 并结合相应的流动模型, 可以计算出中间包内全混流区 (V_m)、活塞流区 (V_p)、滞止流区 (V_d) 的体积分数, 分析钢液的流动特征。

3 结果与讨论

3.1 气幕挡墙对钢液流动特性的影响

由于该中间包结构对称, 取其1/2轴对称截面进行分析。由图 2(a)、(b) 可以看到, 在原始配置条件下的中间包内, 钢液以较大的速度从钢包冲击到湍流控制装置中, 然后经过斜孔挡墙上扬流动, 沿着包底及侧壁流向出口。由此可见, 钢液混合不理想, 上扬去夹杂的有效路径较短, 短路流明显。而采用

气幕挡墙技术后, 如图 2(c)、(d) 所示, 由于吹入的气泡在中间包内形成了气泡幕, 气泡带动钢液向上流动, 改变了钢液的流动方向, 消除了短路流, 起着挡墙的作用。而且由于气体的吹入, 形成的气泡与钢液间相互作用, 在剪切力的作用下, 钢液改变了流动方向, 在气幕挡墙的两侧形成两个方向相反的回流区, 增加了该区域钢液的混合程度, 同时也增大了夹杂物的碰撞长大机率, 有利于夹杂物的上浮去除。在合适的气量下, 气幕墙两侧形成大而弱的旋涡区域, 涡心位置离中间包渣面有一定距离, 钢液向上流动的速度降低, 使靠近液面处钢液的速度低, 不易引起钢液的翻腾, 避免了表面卷渣现象。

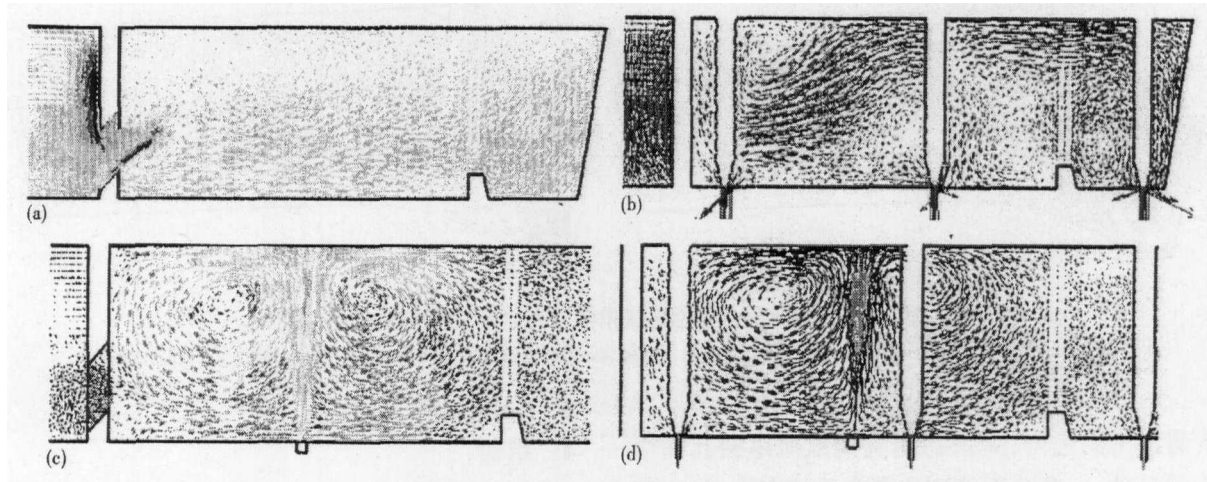


图 2 中间包钢液流场图: (a)(b) 原始配置、无气幕; (c)(d) 优化气幕挡墙技术; (a)(c) 斜孔中心截面; (b)(d) 出口截面
Fig. 2 Liquid steel flow field in tundish: (a) (b) original, without gas curtain; (c) (d) improved, with optimum gas curtain technology; (a) (c) inclined hole center section; (b) (d) exit section

由图 3 及表 1 可以看出, 采用气幕挡墙技术后对 RTD 曲线的影响较大。中间包内钢液的平均停留时间都延长, 死区体积减小, 活塞流体积增大, 有

利于夹杂物的上浮。

图 3 和图 2(c)、(d) 所示, 在原始配置中, 从湍流控制器流出的钢液被斜孔引导流向表面的多数钢

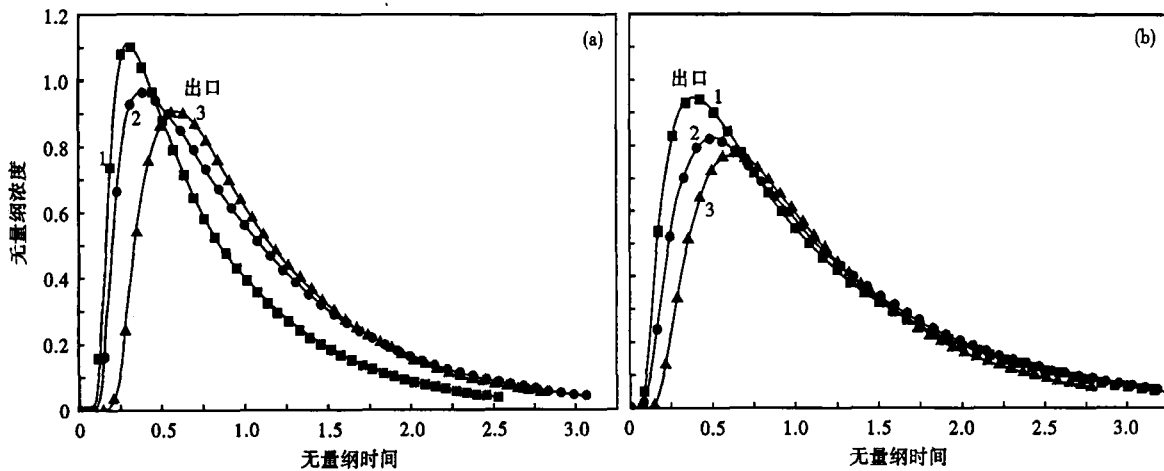


图 3 中间包采用气幕挡墙技术前(a)后(b)钢液停留时间分布(RTD)曲线
Fig. 3 Residence time distribution curves for tundish without (a) and with (b) gas curtain

表 1 中间包采用气幕挡墙技术前后 (RTD) 曲线的分析
Table 1 Analysis on residence time distribution curves for liquid steel in tundish without and with gas curtain

项目	出口	$t_{\min}/$ s	$t_{\text{peak}}/$ s	$t_{\text{av}}/$ s	$T_{\text{av}}/$ s	$V_d/$ %	$V_p/$ %	$V_m/$ %
原始配置	1	22.00	229.00	457.61				
	2	43.00	259.00	546.11	526	36.33	25.61	38.06
	3	109.00	292.00	594.11				
气幕挡墙优化后	1	22.00	301.00	580.58				
	2	56.00	311.00	576.25	578	25.63	30.60	43.77
	3	75.00	326.00	580.95				

液在尚未到达中间包端部时就开始下降,从中间包出水口流出,同时导致中间包端部死区体积的增大。当采用气幕挡墙技术时,钢液与气泡相互作用,气幕挡

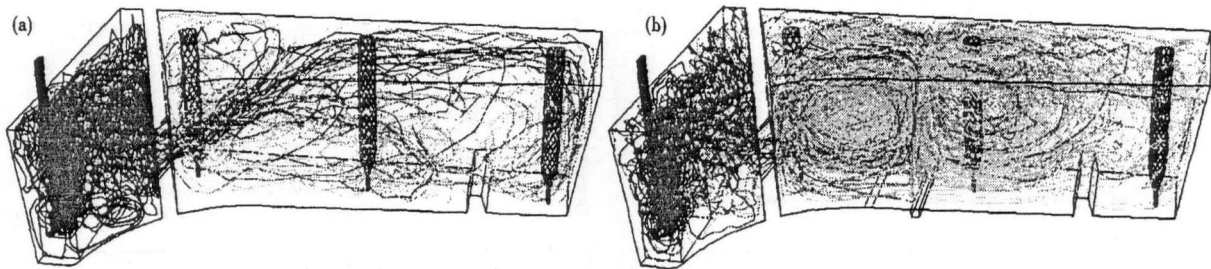


图 4 中间包采用气幕挡墙技术前(a)后(b)夹杂物运动轨迹图

Fig. 4 Moving trace of inclusion particles in liquid steel of tundish without (a) and with (b) gas curtain

始配置的中间包内,夹杂物随着钢液流出斜孔挡墙后上浮运动,一部分不能到达端部而流向出口,夹杂物的总去除率为 53.1% (表 2)。由图 4(b)可见,当采用底部吹气装置后,夹杂物随钢液流出斜孔挡墙后,不能到达端部的夹杂物遇到气幕挡墙后随钢液向上流动而到达液面,被渣捕获使上浮率显著增加,使总去除率增加 11.7%,如表 2 所示。由于在夹杂物模拟计算中考虑了气泡对夹杂物的吸附作用,所有尺寸的夹杂物颗粒的总去除率均增加,且随着夹杂物颗粒尺寸降低,吹气过程对其去除率影响逐渐增加。中间包底部吹气对不同尺寸夹杂物颗粒的影响不同,对于大颗粒夹杂物,吹气对其去除率影响很小,对于 $\leq 50 \mu\text{m}$ 的夹杂物颗粒去除率影响比较显著,其总共在去除率中贡献达 14.3%,使得采用气幕挡墙技术后最终总去除率提高到 79.1%。

表 2 中间包采用气幕挡墙技术夹杂物去除率对比
Table 2 Comparison of removing rate of inclusion in liquid steel in tundish without and with gas curtain

项目	夹杂气泡吸附去除率/%		其它尺寸/ %	总去除率/ %
	10 ~ 50 μm	60 ~ 100 μm		
原始配置	-	-	53.1	53.1
气幕挡墙优化后	12.7	1.6	64.8	79.1

墙的两侧形成两个方向相反的回流区,加强了搅拌,延长了有效路径,从而有效延长了停留时间,减小了死区体积。由表 1 可得,与没有气幕装置相比,当气幕挡墙缩小了近端及远端水口停留时间的差距,响应时间由 87 s 减小到 53 s,峰值时间由 63 s 减小到 25 s,各水口平均停留时间由 137 s 减小到 4 s;钢液在中间包内的平均停留时间延长 52 s,死区体积降低 10.70%,活塞流体积增加,有利于夹杂物的上浮去除。

3.2 气幕挡墙对夹杂物去除的影响

由图 4 可见,在有底部吹气的中间包内,浇铸区夹杂物碰撞长大几率增加,经过气幕挡墙后,大部分夹杂物上浮到液面被渣捕获。如图 4(a)可见,在原

4 结论

采用中间包气幕挡墙技术,可以有效改善钢液的流动状态,均衡各出口对应停留时间,延长钢液的平均停留时间,降低死区体积。并且可有效促进夹杂物颗粒在中间包内上浮和去除。

国家科技攻关计划资助项目(2005BA325C)

参考文献

- 张美杰. 中间包气幕挡墙的结构优化及其夹杂物去除的数学物理模拟研究[博士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2006
- Ramos-Banderas A. Mathematical Simulation and Modeling of Steel Flow with Gas Bubbling in Trough Type Tundish. ISIJ Intern. 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
- 黄奥. 气幕挡墙中间包气泡形成与运动及夹杂物去除的数模研究[硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2007
- 张美杰, 汪厚植, 黄奥. 底吹氩中间罐夹杂物运动行为的数模研究. 连铸, 2006(4): 19
- 张美杰, 汪厚植, 黄奥. 底吹氩中间包钢液流动特性的数值模拟研究. 钢铁钒钛, 2005, 26(4): 43

黄奥(1982-), 男, 博士研究生, 2004 年武汉科技大学毕业, 冶炼过程物理数学模拟, 超纯净钢冶炼等。

收稿日期: 2007-11-16