

## 底吹气中间包内钢液流动及夹杂物去除模拟研究

李晓柄<sup>1</sup> 陈伟庆<sup>1</sup> 崔怀周<sup>1</sup> 王广顺<sup>2</sup> 高永彬<sup>2</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 青岛钢铁集团公司技术中心,青岛 266043)

**摘要** 通过40 t中间包的1:3水模型实验,对小方坯连铸6流中间包内钢液的流场进行了测定,研究了5种不同底吹气方案对中间包内钢液流动特性和夹杂物去除的影响。结果表明,在注流区吹气能延长钢水在中间包内的停留时间,减弱湍流强度,同时注流区内吹气可将气泡击碎成弥散小气泡促进了夹杂物上浮,夹杂物去除效果最佳。在近流与中流水口之间吹气,可改善各流的流动特性,中间包内的流动状况最佳,但近流处夹杂物去除效果略差。在中流和远流水口之间吹气,流场改善效果不理想。

**关键词** 中间包 底吹气 水模拟 夹杂物

## A Study on Simulation of Fluid Flowing and Inclusions Removing for Liquid Steel in Tundish with Bottom Gas Blowing

Li Xiaobing<sup>1</sup>, Chen Weiqing<sup>1</sup>, Cui Huaizhou<sup>1</sup>, Wang Guangshun<sup>2</sup> and Gao Yongbin<sup>2</sup>  
(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;  
2 Technical Center, Qingdao Iron and Steel Group Corp, Qingdao 266043)

**Abstract** The effect of five different bottom gas blowing scheme on flow characteristics of liquid steel and inclusions removing from steel in tundish has been studied by using 1:3 water model-testing for a 40 t tundish to measure the flow field of liquid in tundish for 6 strands billet casting. Results show that the residence time of liquid in tundish is prolonged by gas blowing at injection flow area to decrease the turbulence intensity, while gas blowing at injection flow area is available to break the bubbles to form disperse small bubbles, promote inclusions floating up and get best inclusions removing effect; the gas blowing at area between near flow nozzle and med. flow nozzle is available to improve flow characteristics, at this situation the flow condition of liquid is best but the inclusion removal at near nozzle area is lower; and the gas blowing at area between med. flow nozzle and far flow nozzle is not an idea location to effectively improve the flow field.

**Material Index** Tundish, Bottom Gas Blowing, Water Modeling, Inclusion

中间包底吹气能有效改善钢液流动特性并有利于非金属夹杂物去除,提高钢液洁净度<sup>[1]</sup>。本文通过水模型研究不同位置底吹气对中间包流场的影响,并通过聚苯乙烯塑料颗粒模拟夹杂物去除。

### 1 水模拟实验

#### 1.1 实验原理

根据相似原理,采用 Froude 准数相等,以确保模型与原型的几何相似和动力学相似<sup>[2]</sup>。实际生产中,钢包容量 90 t,中间包容量 40 t。本实验以小方坯连铸 6 流中间包为基础,相似比为 1:3,采用有机玻璃模型模拟中间包,自来水模拟钢液,压缩空气模拟氩气(图 1)。实验采用的弥散型透气砖<sup>[3]</sup>。中间包结构及吹气位置如图 2 所示。

#### 1.2 实验方法

根据相似原理,模型与原型体积流率的关系为  $Q_m = \lambda^{5/2} Q_p$ 。实验时,待中间包内流场稳定后,在钢

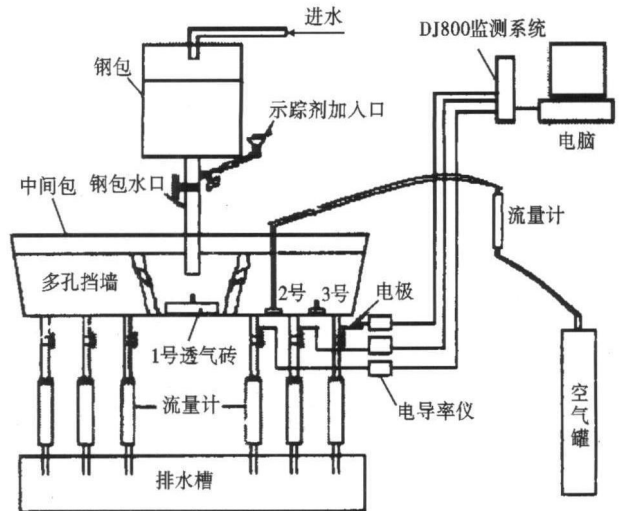


图 1 水模型实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of water model test device

包长水口处脉冲式加入一定量的饱和 KCl 溶液,由电导探头测量各流水口处的电导率随时间的变化规

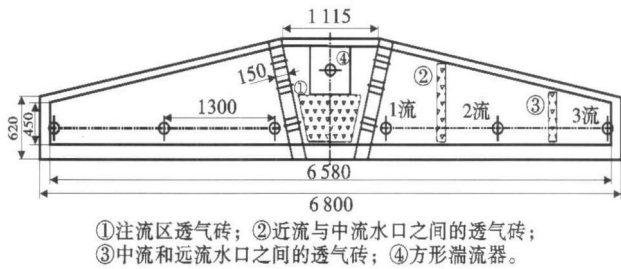


图 2 中间包原型结构及水模拟实验吹气位置示意图

Fig. 2 Original tundish structure and schematic drawing of water modeling gas blowing location

律,达到指定时间后,根据电导率仪记录的数据绘制各水口的 RTD 曲线进行分析。考虑到中间包的对称性,只需测量一侧的 3 个水口,具体为图 2 中的 1、2、3 流水口。实验结果根据 Ahuja 等人提出的模型<sup>[4]</sup>,计算分析中间包死区、活塞流和全混流的体积分数  $V_d$ 、 $V_p$ 、 $V_m$ 。同时,采用标准差(S)考察各流水口水口之间流动特性的分散度。讨论了(1)中间包即包底不吹气(方案 Y);(2)在注流区①号位置吹气(方案 I);(3)在近流与中流水口之间②号位置吹气(方案 II);(4)在中流与远流水口之间③号位置吹气(方案 III);(5)在方案 II 的基础上,注流区加设方形湍流器,位置如图 2 中④所示(方案 IV);(6)方案 III 的基础上,在注流区加设方形湍流器(方案 V)。

用聚苯乙烯塑料颗粒模拟夹杂物,其密度  $\rho_{\text{inc,m}} = 640 \text{ kg/m}^3$ 。采用阶跃式加入方式,测定夹杂物去除,用酒精作为粒子的分散剂,每次随钢包注流加入定量的粒子,在中间包 6 个流的出口处分别用筛子收集,经过 1 200 s (二倍理论停留时间)后停止收集,将收集到的粒子晾干后,统计分析夹杂物的去除。

## 2 实验结果与分析

中间包不吹气实验,从混合模型的结果表 1 及 RTD 曲线图 3(a)可见:(1)峰值时间较短均值只有 64 s,峰值电导率值较高,即大部分流股快速地流出口,流动路径单一形成短路流;(2)死区比例达到 60%,新旧钢液没有充分混合,各流成分温度不均一;(3)RTD 曲线呈“尖峰状”,急剧变化的曲线造成钢液在中间包内停留时间短,不利于夹杂物上浮。

表 1 可见,在注流区①号位置安装透气砖,滞止时间和峰值时间较不吹气实验都有所改进,各流均值分别为 53、93 s,标准差值较小,各流流动特性较一致。死区比例由不吹气实验的 59.06% 降低到 43.44%。在①号位置安装透气砖吹气产生向上运动细小的气泡,降低了钢包长水口流出钢液的湍流强度,分散了流股,钢液经导流孔后,朝向液面运

表 1 各方案实验测得中间包钢液的停留时间和流动模式所占的体积分数

Table 1 Measured residence time of liquid in tundish and different flow mode amounting to volume percentage of total volume for each scheme in test

方案	水口	滞止时间 ( $t_{\text{min}}$ )/s	峰值时间 ( $t_{\text{max}}$ )/s	实际平均停留 时间/s	流动模式/%		
					活塞区	死区	全混区
不吹气	平均值	41	64	257	8.39	59.06	32.55
	标准差	29	26	18	4.43	3.00	1.43
方案 I	平均值	53	93	356	11.59	43.44	44.97
	标准差	33	19	34	4.09	5.47	1.57
方案 II	平均值	37	167	388	16.24	38.10	45.66
	标准差	27	50	74	5.94	11.70	5.91
方案 III	平均值	38	96	340	10.74	45.84	43.42
	标准差	21	92	47	8.94	7.48	2.89
方案 IV	平均值	38	162	399	16.05	35.81	48.14
	标准差	23	79	54	8.16	8.67	0.58
方案 V	平均值	46	83	325	10.35	48.05	41.60
	标准差	25	60	68	6.85	10.89	4.28

动的趋势减弱,流速降低,既增加了钢液在钢包的停留时间,有利于夹杂物的上浮,又减少了钢液对中间包液面及耐火材料的冲刷。图 3(b)可见,在①号位置吹气,RTD 曲线峰值电导率值降低,趋势趋于平缓。

在近流与中流水口之间②号位置安装透气砖时,从表 1 和图 3(c,e)中可见,钢液在中间包内的各流 RTD 曲线更平缓接近正态分布。峰值时间和实际停留时间明显延长,死区比例降低到 38.10%,方案 II 比方案 Y 活塞区比例增大了 1 倍,且各指标的标准差小。钢液经导流孔后受到②号位置透气砖产生向上运动气泡的带动及搅匀作用,有效地改善流场分布,充分活跃了中间包内的钢液,也延长了浇注区钢液的实际停留时间,夹杂物有充足的时间上浮排除。同时,上浮的气泡也能捕获夹杂物,增加碰撞几率,提高去除率。与方案 II 相比,在注流区加设方形湍流器(方案 IV)的峰值电导率降低,各流水口同步性提高,死区比例 35.81%,中间包内的流动效果最佳。

在中流与远流水口之间③号位置安装透气砖时(图 3d,f),只改善了远流的流动特性,对近流和中流没有太大的影响,就整个中间包而言,效果不理想。

从图 4 可以看出,远流水口处夹杂物去除较好,近流和中流水口处夹杂物去除差于远流。在①号位置吹气时,注流区透气砖产生的气泡缓解湍流强度,分散流股,延长停留时间,同时注流区内大的湍流强度可将气泡击碎成弥散小气泡并携带夹杂物上浮。在②号位置吹气时,由于受到近流和中流之间透气砖产生的气幕墙阻挡作用,使得近流水口处的夹杂

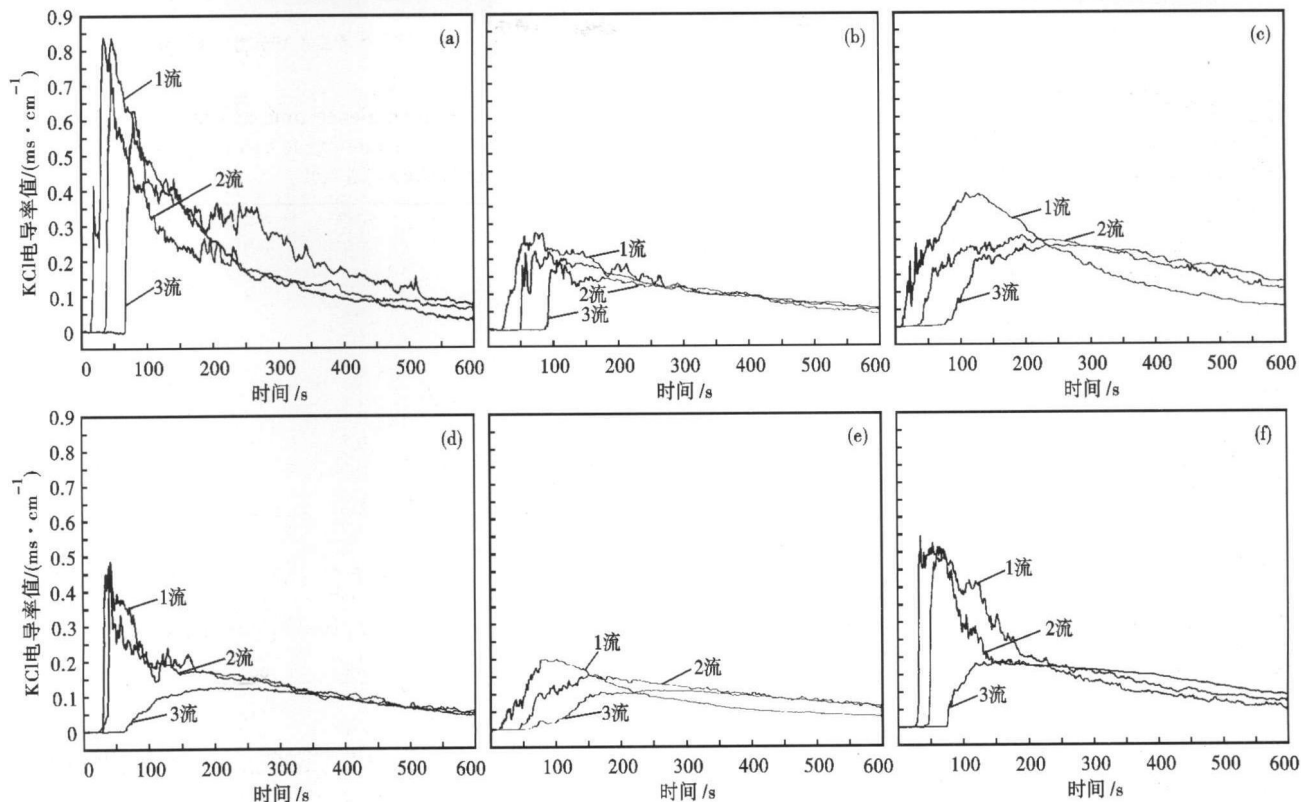


图3 中间包钢水停留时间分布(RTD)曲线:方案Y,不吹气(a);吹气方案- I(b), II(c), III(d), IV(e), V(f)

Fig. 3 Residence time distribution (RTD) curves for liquid in tundish: scheme Y, without bottom gas blowing (a); scheme- I (b), II (c), III (d), IV (e) and V (f) with bottom gas blowing

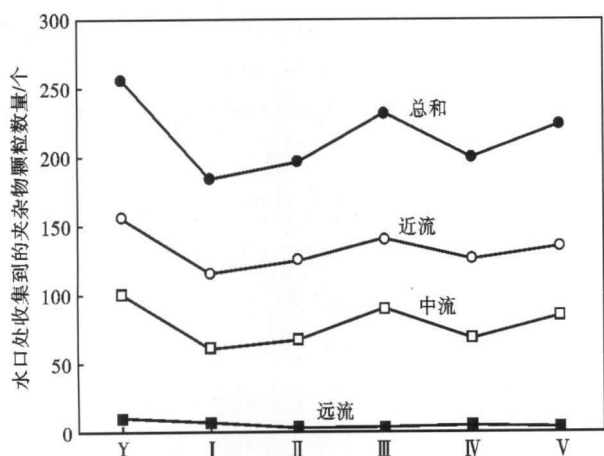


图4 不同方案夹杂物去除实验结果

Fig. 4 Experimental results of inclusion removal for different scheme

物去除效果差于在①号位置吹气。在③号位置吹气时,对夹杂物去除效果与不吹气方案 Y 相比改善不明显。当在②和③号位置吹气时,注流区是否加设湍流器(即 II 和 IV 方案相比、III 和 V 方案相比),对夹杂物去除效果的影响不大。

### 3 结论

(1)原型中间包不吹气时存在明显的短路流,包内钢液的流速较大,对耐火材料及覆盖剂冲刷较大;滞止时间和实际停留时间较短,不利于夹杂物上

浮;死区比例较大,不利于成分和温度的均匀。

(2)在注流区①号位置吹气,阻止了钢液直接流向水口,避免了短路流,减弱了湍流强度,并且延长了钢水在中间包内的停留时间,同时注流区内大的湍流强度可将气泡击碎成弥散小气泡促进了夹杂物上浮,夹杂物去除效果最佳。

(3)在②号位置吹气,近流水口处的夹杂物去除效果略差于在①号位置吹气;③号位置吹气,只对远流水口处的流场特性有改善作用;在②号或③号位置吹气同时加设湍流器时,夹杂物去除效果不如在注流区吹气。

### 参考文献

- 1 黄 奥,汪厚植,顾华志,等.气幕挡墙中间包夹杂物去除的水模型研究.特殊钢,2009,30(1):7
- 2 王建军,包燕平,曲 英.中间包冶金学.北京:冶金工业出版社,2001
- 3 丰文祥.弥散型透气砖的研制及中间包吹氩去除钢液夹杂物的研究:[博士论文].北京:北京科技大学,2010
- 4 Singh S,Ahuja R. Fluid Dynamics of Continuous Casting Tundishes-Physical Modeling. Ironmaking & Steelmaking. 1986,13(5):241

李晓柄(1986-),女,硕士研究生,钢铁冶金工艺技术研究。

收稿日期:2010-05-20