

## 连铸中间包结构优化及夹杂物去除的水模拟研究

高锦国 李京社 唐海燕 杨树峰  
(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

**摘要** 以25 t中间包为原型,通过实验相似比 $\lambda = 1:2.3$ 的水模型,分析了4流近似T型中间包3种挡墙形式包内流场及夹杂物去除。结果表明,原挡墙控流下的中间包同一侧两流之间的流体流动特性差异很大,与内侧相比,外侧流的最短停留时间和峰值时间长,死区体积大,造成中间包内钢液温度不均匀,夹杂物不能有效地上浮去除;U-型挡墙能延长峰值时间,但是最短停留时间短,死区比例较大;采用Y-型挡墙可以有效地改变中间包内流场分布,促进夹杂物上浮。30CrMo钢工业试验表明,采用Y-型挡墙钢中大型夹杂物较原用挡墙降低16.9%。

**关键词** 连铸中间包 水模型 流场 夹杂物

### A Study on Water Simulation for Optimizing Tundish Structure and Inclusion Removal in Concasting

Gao Jinguo, Li Jingshe, Tang Haiyan and Yang Shufeng  
(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** According to prototype 25 t tundish, the liquid flow field and the removal of inclusions in an approximate T-shape tundish with three kinds of weirs in 4-strand casting have been analyzed by using experimental similarity ratio  $\lambda = 1:2.3$  water model. Results showed that by using original weir, there was a great difference in flow characteristics between two outlets at the same side of tundish, and compared to inside outlet the outside outlet had longer minimum residence time and peak time and large dead zone volume led to liquid temperature variation and delaying inclusion floatation; by using U-type weir, the peak time could be prolonged, but with short minimum residence time and large dead zone volume; and by using Y-shape weir it was available to efficiently change the liquid flow distribution in tundish and improve inclusion removal. The commercial test for steel 30CrMo indicated that with using Y-weir the large inclusion amount in steel decreased by 16.9% as compared with using original weir.

**Material Index** Tundish for Casting, Water Modeling, Flow Field, Inclusion

针对钢厂原用4流近似T型中间包存在的钢液分配不均,造成各流钢液温度和铸坯质量相差大的现象,重新设计了U-型挡墙和Y-型挡墙,采用水模拟实验研究了3种挡墙(原用、U-型、Y-型)下中间包内钢液的流动,并用聚苯乙烯塑料粒子模拟这3种情况下夹杂物的去除效果。

#### 1 实验方法

##### 1.1 流场实验

水模拟实验的理论依据是相似原理。中间包内钢液的流动,一般可视为粘性不可压缩稳态流动,因此系统只要满足几何相似和动力相似就可以满足模型和原型的相似。中间包内钢液流动与模型中水的流动处于同一自模化区<sup>[1,2]</sup>,所以只要保证模型与原型的Froude准数相等,就可以保证模型(下标用 $m$ 表示)和原型(下标用 $p$ 表示)的相似,即:

$$Fr = \frac{u_m^2}{gL_m} = \frac{u_p^2}{gL_p} \quad (1)$$

由此计算出模型所对应于原型的体积流量和水

口流速,即:

$$Q_m = \lambda^{2.5} Q_p \quad (2)$$

$$u_m = \lambda^{0.5} u_p \quad (3)$$

钢厂生产流程:原料(废钢、海绵铁、铁水等)-90 t超高功率电弧炉(EBT-EAF)-二次精炼LF(VD)-喂CaSi线(WF)-圆坯连铸机(CC);生产钢种有:30CrMo、27SiMn、37Mn、39Mn2V等,主要用于制造无缝钢管。本实验以25 t中间包为原型,水模拟实验相似比 $\lambda = 1:2.3$ 。模型与原型对应的工艺参数如表1所示。实验的3种挡墙形式如图1所示。

表1 原型和水模型的主要工艺参数

Table 1 Main process parameters for prototype and water model

项目	参数	
	原型	模型
单个水口流速/( $m \cdot \min^{-1}$ )	1.80	1.187
工作液面高/mm	760	330
流间距/mm	1 600	696
单个水口流量/( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	4.103	0.511
水口插入液面深/mm	180	78

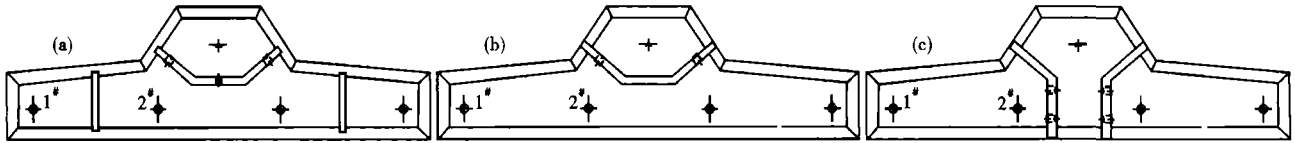


图 1 实验的 3 种挡墙形式:(a)原用;(b)U-型;(c)Y-型

Fig. 1 Three kinds of experimental weirs; (a) original; (b) U-shape; (c) Y-shape

实验采用“刺激-响应”方法<sup>[3-6]</sup>,当中间包液面保持在适当高度、流场稳定后,在长水口处脉冲加入一定量的饱和 KCl 溶液作为示踪剂,同时在中间包 1#和 2#出水口处安装电导电极并利用电导仪、计算机及数据采集系统测定示踪剂浓度随时间的变化曲线,此曲线即为 RTD(Resident Time Distribution)曲线,求得各出水口处平均停留时间和最短停留时间,计算出死区的体积分数。

1.2 夹杂物上浮模拟实验

夹杂物在中间包钢液中的运动速度可分解为两部分<sup>[7,8]</sup>:流体流动的速度  $u_f$  和夹杂物上浮速度  $u_{inc}$ 。其中  $u_{inc}$  满足 Stokes 定律,表达式如下:

$$u_{inc} = \frac{(\rho_f - \rho_{inc})gd^2}{18\mu_f} \quad (4)$$

式中: $\rho_f$ -流体的密度; $d$ -夹杂物颗粒直径。

为保证模拟夹杂物与实际夹杂物的运动轨迹相似,其运动速度应满足以下方程:

$$\frac{u_{f,m}}{u_{f,p}} = \frac{u_{inc,m}}{u_{inc,p}} \quad (5)$$

根据(3)式,可知模拟的夹杂物颗粒的上浮速度与中间包中实际夹杂物上浮速度之间的对应关系为:

$$\frac{u_{f,m}}{u_{f,p}} = \lambda^{0.5} \quad (6)$$

将(4)式代入(6)式,并假定钢液运动粘度系数与水的运动粘度系数相等,可得到水模拟中夹杂物颗粒直径  $d_{inc,m}$  与钢水中非金属夹杂物颗粒直径  $d_{inc,p}$  的对应关系为:

$$\frac{d_{inc,m}}{d_{inc,p}} = \lambda^{0.25} \cdot [(1 - \rho_{inc,p}/\rho_p)/(1 - \rho_{inc,m}/\rho_m)]^{0.5} \quad (7)$$

实验所用聚苯乙烯塑料颗粒模拟夹杂物,其密度  $\rho_{inc,m} = 640 \text{ kg/m}^3$ 。将该塑料颗粒分别过 50、100、150、200 目筛,可筛得粒径在 270、150、106、75  $\mu\text{m}$  的颗粒。根据式(7)可求得钢液中对应夹杂物的粒径分别为 255、141、100、70  $\mu\text{m}$ 。

夹杂物上浮率的测定采用阶跃式加入方式,用酒

精作为塑料粒子的分散剂,每次随钢包注流加入定量 ( $W_e$ ) 的塑料粒子,然后在中间包 1#、2# 水口下收集塑料粒子的捕集量 ( $W_g$ )。用式(8)计算上浮率。

$$\eta = (1 - W_g/W_e) \times 100\% \quad (8)$$

1.3 工业试验

分别取中间包在原用挡墙形式和改进后 Y-型挡墙控流下的铸坯样,取样钢种为 30CrMo 和 27SiMn,各取一个浇次连续的 5 炉钢的铸坯样,加工后做钢中 T[O] 和大型夹杂物 ( $\geq 50 \mu\text{m}$ ) 分析。

2 结果与讨论

2.1 3 种挡墙对中间包流场的影响

3 种挡墙的实验结果如表 2 所示,图 2 是对应的 RTD 曲线。表中 U-型挡墙和 Y-型挡墙都是经过正交实验优选出来的在此种挡墙形式下最优的方案。

由表 2 和图 2 可看出,原用挡墙中间包同一侧两流之间的流体流动特性存在很大差异,1#水口的最短停留时间、峰值时间都较 2# 长,死区比例大,造成中间包内钢液温度分布不均匀,夹杂物不能有效地上浮去除。U-型挡墙能延长两个水口的峰值时间,但最短停留时间短,且中间包内死区比例也较大,夹杂物得不到有效上浮。Y-型挡墙由于冲击区较前两种挡墙形式扩大,各流的平均停留时间延长,在满足两流同步性的情况下,死区比例明显下降。

表 2 3 种挡墙形式下中间包内流场实验结果  
Table 2 Experimental results of liquid flow field with three kinds of weirs in tundish

挡墙	最短停留时间/s		峰值时间/s		平均停留时间/s		死区比例/%	
	1#	2#	1#	2#	1#	2#	1#	2#
原用	50	40	61	42	449	342	15.92	35.96
U-型	33	34	138	205	417	445	21.97	16.66
Y-型	48	47	234	244	479	477	10.30	10.67

2.2 挡墙形式对夹杂物去除的影响

夹杂物上浮去除水模型实验结果如表 3 所示,原用中间包挡墙形式控流下 1# 和 2# 水口收集的塑料粒子质量相差很大,在粒径为 106  $\mu\text{m}$  的塑料粒子的去除实验中,1# 水口收集到的塑料粒子量为

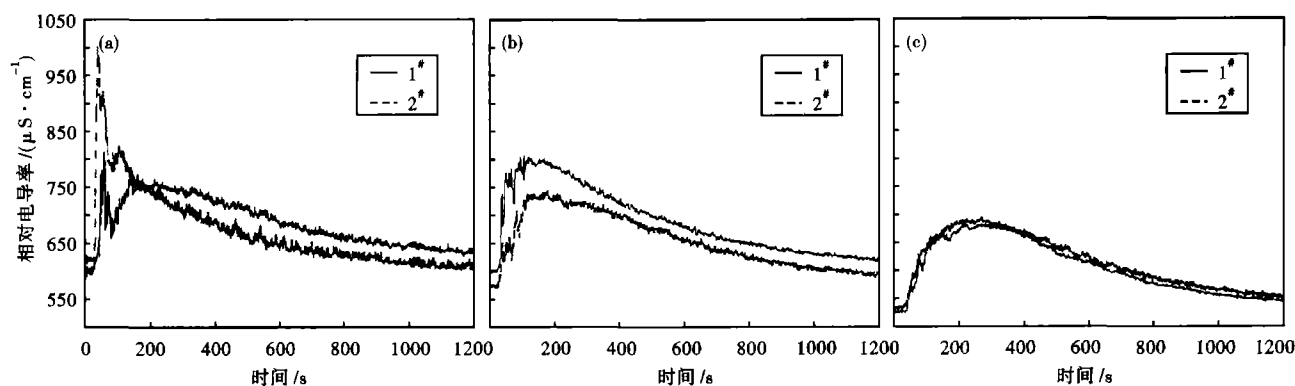


图 2 3 种挡墙下各水口钢液停留时间分布 (RTD) 曲线:(a)原用;(b)U-型;(c)Y-型

Fig. 2 Residence time distribution curves of three kinds of experimental weirs at each outlet; (a) original; (b) U-shape; (c) Y-shape

表 3 3 种挡墙下夹杂物上浮率实验结果

Table 3 Experimental results of inclusion removal ratio with three kinds of weirs

模拟用的粒子粒径/ $\mu\text{m}$	挡墙	收集的粒子质量/g		去除率/ %
		1#水口	2#水口	
270	原用	0.172	0.234	99.19
	U-型	0.210	0.200	99.18
	Y-型	0.080	0.080	99.68
150	原用	0.852	1.211	95.87
	U-型	0.805	0.819	96.75
	Y-型	0.372	0.376	98.50
106	原用	1.332	2.109	93.12
	U-型	1.288	1.360	94.70
	Y-型	0.994	1.003	96.01
75	原用	3.782	7.718	77.00
	U-型	5.322	5.175	79.01
	Y-型	3.421	3.532	86.09

1.332 g, 2#为 2.109 g, 是 1#的 1.58 倍。U-型和 Y-型挡墙下中间包同侧的两个水口所收集的塑料粒子量很接近。

去除率原用挡墙形式、U-型、Y-型依次增大, 3 种挡墙形式对于粒径大的颗粒 ( $\geq 100 \mu\text{m}$ ) 都有很好的去除效果 ( $\geq 90\%$ )。随着模拟夹杂物的粒子粒径变小, 颗粒上浮速度也变小, 去除率减小。

### 2.3 改进的挡墙生产应用效果

铸坯中 T[O] 和大型夹杂物含量检测结果如表 4 所示。从试验结果来看, 中间包在 Y-型挡墙控流

表 4 原用和 Y-型挡墙控流下工业试验结果

Table 4 Commercial test results with original weir and Y-shape weir

钢种	挡墙	T[O]/ $10^{-6}$		大型夹杂物含量/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	
		1#流	2#流	1#流	2#流
30CrMo	原用	14	17	0.13	1.06
	Y-型	12	11	0.44	0.55
27SiMn	原用	12	8	0.31	1.21
	Y-型	10	10	0.45	0.71

下, 各流铸坯间 T[O] 和大型夹杂物含量更加均匀, 30CrMo 在原用挡墙下大型夹杂物数量为 0.59  $\text{mg}/\text{kg}$ , Y-型为 0.49  $\text{mg}/\text{kg}$ , 降幅 16.9%, 说明用 Y-型挡墙铸坯质量稳定, 有利于提高铸坯洁净度。

### 3 结论

与原用挡墙和 U-型挡墙相比较, Y-型挡墙在保证各流同步性下, 适当延长了钢液在中间包内的停留时间, 中间包内死区小, 且分布均匀, 钢液在中间包内流动平稳, 夹杂物上浮机会增加, 有利于提高钢水洁净度; 工业试验表明, 中间包用 Y-型挡墙控流铸坯质量稳定, 铸坯洁净度高。

### 参考文献

- 1 王建军, 包燕平, 曲英. 中间包冶金学. 北京: 冶金工业出版社, 2001
- 2 Sahai Y, Burval M D. Validity of Reynolds and Froude Similarity Criteria for Water Modeling of Melt Flow in Tunishes // Iron and Steel Society Inc eds. Proc of the Electric Furnace Conf. Atlant; Catanzarite K A, 1992, 469
- 3 Cho J S, Lee H G. Gold Model Study on Inclusion Removal From Liquid Steel using Fine Gas Bubbles. ISIJ Int, 2001, 41(2): 151
- 4 樊俊飞, 张清朗, 朱苗勇, 等. 六流 T 型连铸中间包内控流装置优化的水模型研究. 钢铁, 1998, 33(5): 24
- 5 阮小江, 李京社, 王剑斌, 等. 兴澄特钢中间包结构优化. 北京科技大学学报, 2007, 29(Suppl. 1): 138
- 6 Koria S C, Singh S. Physical Modeling of the Effects of the Flow Modifier on the Dynamics of Molten Steel Flowing in a Tunish. ISIJ Int, 1994, 34(10): 784
- 7 李东辉, 李宝宽, 赫冀成. 中间包双板多孔挡墙流动控制去除夹杂物效果的模拟研究. 金属学报, 1999, 35(10): 1107
- 8 张胜军, 郑淑国, 朱苗勇. 连铸中间包内夹杂物去除行为的水模型研究. 北京科技大学学报, 2007, 29(8): 781

高锦国 (1980-), 男, 助理工程师, 硕士生, 北京科技大学毕业, 主要从事钢的洁净度研究。

收稿日期: 2008-07-22