

## 中间包内部结构对铸坯洁净度的影响

唐海燕 李京社 包燕平 蒋静 李涛 吉传波

(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

**摘要** 通过1:2.5中间包水模型试验对4流25 t两种控制装置中间包内流场进行了研究,并通过工业生产试验了原中间包和改变挡墙侧导流孔孔径、倾角,并增加湍流控制的改进型中间包对325 mm×280 mm GCr15钢铸坯洁净度的影响。结果表明,改进型中间包能增加钢液在中间包内的停留时间,减小中间包的死区比例,提高夹杂物的去除率。与原中间包相比,从改进型中间包到铸坯过程中总氧去除率提高,大型夹杂物含量降低44.9%。

**关键词** 中间包 控流装置 洁净度

## Effect of Inner Structure of Tundish on Cleanliness of Casting Bloom

Tang Haiyan, Li Jingshe, Bao Yanping, Jiang Jin, Li Tao and Ji Chuanbo

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** A study on the field of fluid flow in 4-strand 25 t tundish with two different control devices has been carried out by 1:2.5 tundish water model test. And the effect of original tundish and improved tundish with modified diameter of hole for guide fluid at side of dam and its inclination, and added turbulent inhibitor on cleanliness of 325 mm×280 mm casting bloom of bearing steel GCr15 is tested by commercial production. Results show that the improved tundish is available to increase residence time of liquid steel in tundish, decrease dead volume fraction of tundish, increase removal rate of inclusion in liquid. Compared with the original tundish, the removal rate of total oxygen in liquid steel from improved tundish to bloom increases, the macro-inclusion content decreases by 44.9%.

**Material Index** Tundish, Flow Control Device, Cleanliness

采用水模型试验研究了钢厂中间包内钢水的流动特性,并在此基础上优化了中间包的内部结构,改变了导流孔的孔径和倾角,并增加了湍流控制器。通过工业试验研究了优化后的中间包对总氧含量和夹杂物的影响。

### 1 水模型实验

#### 1.1 实验原理及方法

中间包内钢液的流动一般可视作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<sup>[1,2]</sup>。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>[3]</sup>,所以只要保证模型和原型的  $Fr$  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:

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

式中: $Fr$ - Floude 准数; $u$ - 流体速度/( $m \cdot s^{-1}$ ); $g$ - 重力加速度/( $m \cdot s^{-2}$ ); $L$ - 特征长度/ $m$ ; $m$ - 模型; $p$ - 原型。

模型所对应于原型的体积流量和水口流速:

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

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

式中: $Q$ - 体积流量/( $m^3 \cdot h^{-1}$ ); $\lambda$ - 几何相似比。

本实验选取实际连铸生产过程中25 t四流中间包为原型,选取模型与原型的几何相似比为 $\lambda = 1/2.5$ 。模型与原型对应的工艺参数如表1所示。

表1 中间包原型与模型的主要工艺参数

Table 1 Main process parameters of prototype and model of tundish

中间包	工作液面高度/mm	流间距/mm	单个水口流量/ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	水口插入液面深度/mm
原型	900	1 500	3.0	150
模型	360	600	0.304	60

原中间包挡墙两侧各有一个上倾角为 $15^\circ$ ,孔径为60 mm的导流孔,前方有一上倾角为 $15^\circ$ ,孔径为32 mm的导流孔,如图1(a)所示。改进型中间包外形尺寸不变,将挡墙的侧导流孔孔径均改为40 mm,前方导流孔孔径不变,倾角均改为 $25^\circ$ ,是通过正交实验优化出来的结果,同时增加湍流控制器,湍

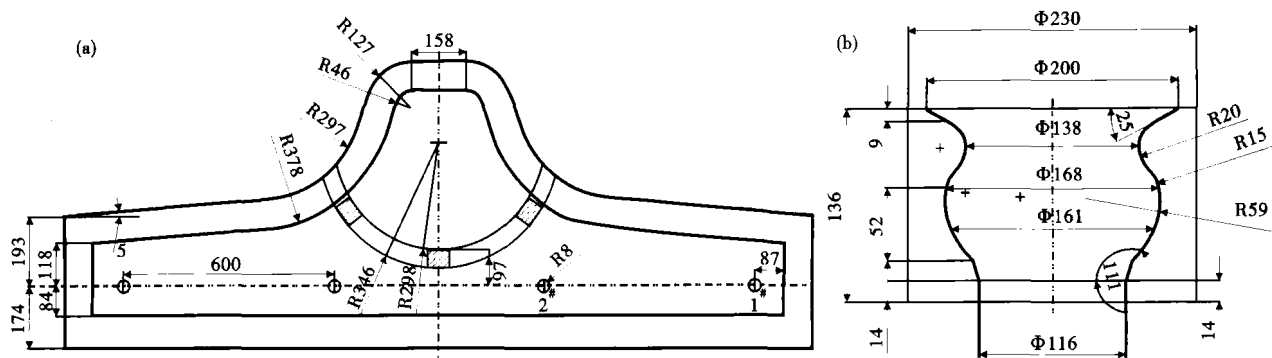


图 1 原中间包(a)及改进型中间包湍流控制器(b)示意图

Fig. 1 Sketch of original tundish (a) and turbulent inhibitor of improved tundish (b)

流控制器形状及尺寸如图 1(b) 所示(图中给出的均是水模型尺寸)。

实验采用“刺激-响应”方法<sup>[4]</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示踪剂- 饱和 KCl 溶液, 同时在中间包一侧 1#(边部) 和 2#(中部) 出水口处利用电导率仪、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(RTD)。从 RTD 曲线可直接得到从加入示踪剂到示踪剂流至中间包水口时的最小停留时间  $t_{\min}$  (又称响应时间) 和示踪剂浓度达到最大时的峰值时间  $t_{\max}$ 。通过对停留时间分布曲线积分, 还可得到各流体微元在中间包的\*\*实际平均停留时间  $t_{av}$ 。

$$t_{av} = \frac{\int_0^{\infty} tc(t) dt}{\int_0^{\infty} c(t) dt} = \frac{\sum_i t_i c(t_i) \Delta t_i}{\sum_i c(t_i) \Delta t_i} \quad (4)$$

式中:  $c(t)$  -  $t$  时刻示踪剂的浓度。

理论平均停留时间:  $t_s = V_R/Q$

式中:  $V_R$  - 中间包内水的体积/ $m^3$ 。

以理论平均停留时间  $t_s$  作为基准时间, 除停留时间  $t$ , 可得出无因次平均停留时间  $\theta_{av}$ :

$$\theta_{av} = \frac{t_{av}}{t_s}$$

按照混合模型理论, 死区占中间包流体体积的比例为:  $V_d = 1 - \theta_{av}$

由于中间包是对称的, 所以只取两流的结果。

## 1.2 实验结果及分析

从表 2 可以明显看出, 原挡墙形式下边部和中部水口的最小停留时间短且相差很大, 边部水口的最小停留时间为中部水口的 1.9 倍, 两流的实际平均停留时间和死区体积分数相差也较大。通过墨汁显示的流场发现, 墨汁经长水口加入后, 流速很快,

表 2 原型和改进型中间包内液体流动特性

Table 2 Characteristics of fluid flow in original and improved tundish

挡墙类型	水口	$t_{\min}/s$	$t_{\text{peak}}/s$	$t_{av}/s$	$V_d/\%$
原挡墙	中部	21	305	624	16.42
	边部	39	268	581	22.18
改进型	中部	65	340	702	5.80
	边部	58	328	680	7.00

大部分从导流孔流出, 由于侧导流孔距离中部水口近且上倾角度小, 前方导流孔距离包底近, 使得墨汁很快流到中部水口。

改进型挡墙由于减小了侧导流孔孔径增加了上倾角, 使得从孔中流出的钢液先到达液面, 然后再扩散进入中部和边部水口, 湍流控制器也有效地延长了钢液在中间包内的停留时间, 因而中间包内液体流动特性得到明显改善。

## 2 工业试验

改进了生产用中间包的挡墙, 并增加了湍流控制器, 其结构尺寸均是水模型的 2.5 倍。

### 2.1 试验方法

工艺流程为: 70 t 转炉 → LF → RH → 4 流中间包 → 连铸, 对使用原挡墙和改进型挡墙加湍流控制器的生产工艺分别在中间包和铸坯上进行取样分析, 取样钢种为 GCr15, 连铸坯断面 325 mm × 280 mm。在每个浇次的第 2、3 炉的钢包钢水浇铸到一半时, 从中间包中取圆饼样各 2 个。在中间包取样结束 30 min 后分别取边部流与中间流的铸坯各一块, 去皮后在内弧 1/4 处分别切取气体样、大样和金相样。检验夹杂物时, 为 400 ×, 每个金相样观察 100 个视场。将尺寸分为 0 ~ 2.0、2.0 ~ 4.0、4.0 ~ 10.0、10.0 ~ 20.0、> 20.0  $\mu\text{m}$  五级计算夹杂物数量, 计算公式为:

$$I = \frac{\sum d_i \cdot n_i}{\pi B D^2 \cdot N/4}$$

式中: $I$ -单位面积上当量直径为 $B$ 的夹杂物个数/(个·mm<sup>-2</sup>); $d_i$ -不同尺寸范围夹杂物的平均直径,对0~2.0、2.0~4.0、4.0~10.0、10.0~20.0、>20.0 μm 各级夹杂的平均直径分别取1.0、3.0、7.0、15.0、30.0 μm; $n_i$ -不同尺寸范围夹杂物的个数; $B$ -夹杂物的当量直径/7 μm; $D$ -视场直径/300 μm; $N$ -视场数/100个。

## 2.2 结果及讨论

### 2.2.1 总氧(T[O])含量的变化

可用全氧量间接衡量钢中氧化物夹杂的总数量<sup>[5]</sup>。当使用原挡墙控流时,从中间包到铸坯钢水的T[O]由(12~16)×10<sup>-6</sup>降为(8~11)×10<sup>-6</sup>;而当使用改进型挡墙控流时,T[O]由中间包钢水的(14~18)×10<sup>-6</sup>降为铸坯的(9~10)×10<sup>-6</sup>,表明改进型中间包从中间包到铸坯T[O]下降较原型明显。尽管改进前后铸坯两流的T[O]均相同,但改进后两炉间的总氧波动较小。针对该厂的中间包结构,单纯依靠改进控流装置还不足以降低铸坯的总氧。

### 2.2.2 显微夹杂物的数量比较

使用原型中间包,铸坯中相当于当量直径7 μm的夹杂物平均为5.16个/mm<sup>2</sup>,使用改进型中间包,夹杂物降低到5.02个/mm<sup>2</sup>,且改进后两流间的夹杂物数量差距减小。使用两种中间包其铸坯中的显微夹杂物粒径在0~4 μm的均占90%以上,这是因为,由Stokes上浮公式可知夹杂物粒径越小,在液体中上浮的速度也越小,很难被上浮去除,故中间包主要用于去除大型夹杂物。

### 2.2.3 大型夹杂物的变化

为了客观反映钢中夹杂物的真实面貌,将铸坯样加工成≥2 kg的方块,按文献[6]所示方法进行大样电解,夹杂物含量用每10 kg钢中所含毫克数表示,结果见表3。

由表3可以看出,使用原挡墙中间包,铸坯中部流的夹杂物比边部流多,这和水模型实验是一致的。因为中部流的滞止时间只有29 s,夹杂物来不及充分上浮。使用改进型挡墙并加湍流控制器的中间包能够延长滞止时间和实际平均停留时间,减小死区比例,因而显著降低了铸坯中大型夹杂物的含量。与使用原挡墙的中间包相比,大型夹杂物平均含量由2.27 mg/10 kg降为1.25 mg/10 kg,降低了44.9%。对于改进型中间包,由于钢液在中部流的停留时间比在边部流长,因而中部流铸坯的夹杂物

表3 各流铸坯大型夹杂物含量/[mg·(10kg)<sup>-1</sup>]

Table 3 Macro-inclusion content in bloom of each strand/[mg·(10kg)<sup>-1</sup>]

中间包	炉号	部位	夹杂物含量	夹杂物	平均含量
原型	33	I	1.71	1.70	2.27
	34	I	1.70		
	33	II	2.84		
	34	II	2.84		
改进型	22	I	2.53	2.21	1.25
	23	I	1.89		
	22	II	-		
	23	II	0.56		

注:部位 I 代表边部流,II 代表中部流。

比边部流少。

## 3 结论

(1)水模型试验得出,原挡墙控流下中间包内存在较大死区,且边部流与中间流之间流体流动特性差异很大,改进型挡墙控流使中间包内液体流动特性明显改善,滞止时间、峰值时间和平均停留时间明显延长,死区比例减小,边部流和中部流的流动特性趋于一致。

(2)工业试验表明,使用原型中间包,从中间包到铸坯钢水的T[O]由14×10<sup>-6</sup>降为10×10<sup>-6</sup>,降低了28.57%;而当使用改进型中间包时,T[O]由中间包钢水的16×10<sup>-6</sup>降为铸坯的9×10<sup>-6</sup>,降低了43.75%。

(3)使用改进型挡墙的中间包能够显著降低铸坯中大型夹杂物的含量,与使用原型挡墙的中间包相比大型夹杂物含量降低44.9%。

## 参考文献

- 1 Yogeshwar Sahai, Toshihiko Emi. Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes. ISIJ International, 1996, 36(6): 667
- 2 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(增刊): 138
- 3 Sahai Y, Burval M D. Validity of Reynolds and Froude Similarity Criteria for Water Modeling of Melt Flow in Tundishes. Iron and Steel Society Inc eds. Proc of the Electric Furnace Conf. Atlant; Catanzarite K A, 1992: 469
- 4 Koria S C, Singh S. Physical Modeling of the Effects of the Flow Modifier on the Dynamics of Molten Steel Flowing in a Tundish. ISIJ International, 1994, 34(10): 784
- 5 唐海燕, 李京社, 杨树峰, 等. EAF-LF-VD-CC 工艺生产压力容器钢的洁净度研究. 钢铁, 2008, 43(1): 21
- 6 董履仁, 刘新华, 韦远, 等. 钢中大型非金属夹杂物. 北京: 冶金工业出版社, 1991

唐海燕(1970-),女,博士,讲师,纯净钢理论与工艺研究。

收稿日期:2009-05-12