

· 试验研究 ·

### 300 t 钢包顶底复合吹氩预脱硫工艺的物理模拟

朱伦才 焦兴利

(马钢股份有限公司第四钢轧总厂, 马鞍山 243000)

**摘要** 对300 t顶底复合吹氩钢包预脱硫工艺进行几何相似比1:5.75的水模型试验。结果表明,总供气量相同时,与单吹相比顶底复吹能有效提高预成渣速度,当顶底吹氩流量比为50:50,搅拌条件最好;根据水模型试验结果,在300 t钢包上建立顶、底吹氩装置,在微合金站实现预成渣脱硫,钢水平均脱硫率达22.29%,处理后平均终点[S]为0.004%,(FeO+MnO)降至3.48%。

**关键词** 300 t钢包顶底复吹氩 预成渣脱硫 水模型

### Physical Simulation on Pre-Desulfurization Technology in a 300 t Ladle by Top and Bottom Combined Argon Blowing

Zhu Luncai and Jiao Xingli

(No4 Steelmaking and Rolling General Plant, Ma'anshan Iron and Steel Co Ltd, Ma'anshan 243000)

**Abstract** The test of pre-desulfurization technology of a 300 t top and bottom combined argon blowing ladle has been carried out by using a water model with geometric similarity 1:5.75 water model. Results show that with same total gas flow, as compared with single blowing the top and bottom combined blowing could effectively increase the pre-slugging speed, and as flow rate of top-bottom argon blowing is 50:50, the stirring condition is best; based on the water model test results the top-bottom combined argon blowing installation for the 300 t ladle is established to realize the liquid pre-slugging desulfurization, the liquid average desulfurization ratio is 22.29%, after refining the average end [S] is 0.004% and the (FeO + MnO) decreases to 3.48%.

**Material Index** 300 t Ladle Top and Bottom Combined Argon Blowing, Pre-Slagging Desulfurization, Water Model

#### 1 顶底复合吹氩的冷态模拟研究

##### 1.1 实验装置

在顶底复吹冷态模拟实验中,重力和惯性力是起决定作用的,故在保证炉型几何相似的前提下,只需保证模型和原型的修正佛鲁德准数相等。实验装置流程如图1,模型与原型的相关参数见表1。

修正佛鲁德准数见公式(1)<sup>[1]</sup>。根据修正佛鲁德准数  $Fr'$  相等,可知:

$$\frac{\rho_a V_a^2}{\rho_w g d_{模}} = \frac{\rho_{Ar} V_{Ar}^2}{\rho_s g d_{实}} \quad (1)$$

式中: $\rho_{Ar}$ -标准状态下氩气密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $V_{Ar}$ -氩气气流速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

模型流量( $Q_{模}$ )及原型中气体流量( $Q_{Ar}$ )为:

$$Q_{模} = V_a \left( \frac{\pi}{4} d_{模}^2 \right) \times 3600 \quad (2)$$

$$Q_{Ar} = V_{Ar} \left( \frac{\pi}{4} d_{实}^2 \right) \times 3600 \quad (3)$$

合并式(1)、(2)、(3)可以得到实验中气体流量( $Q_{Ar}$ )与实际气体流量( $Q_a$ )的关系:

$$\frac{Q_a}{Q_{Ar}} = \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_s} \cdot \frac{\rho_{Ar}}{\rho_a}} \cdot \left( \frac{d_{模}}{d_{实}} \right)^2 \cdot \left( \frac{d_{模}}{d_{实}} \right)^{1/2} \quad (4)$$

将相关参数(见表2)代入式(4)。

$$Q_a = 5.6 \times 10^{-3} \cdot Q_{Ar} \quad (5)$$

##### 1.2 实验原理

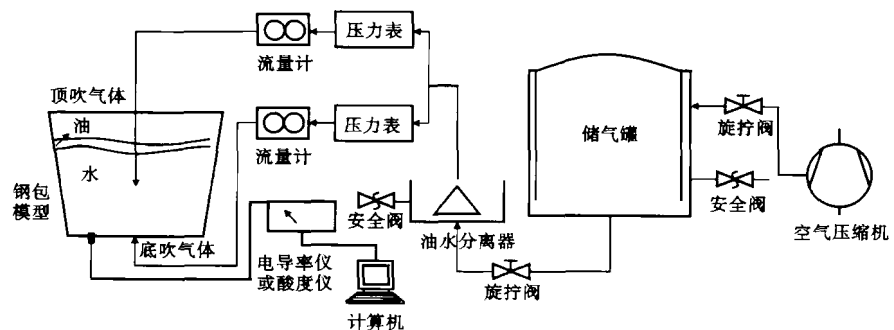


图1 300 t钢包水模型实验装置示意图  
Fig.1 Sketch of water model test installation for a 300 t ladle

表 1 300 t 钢包原型与水模型有关参数

Table 1 Relative parameters of 300 t ladle prototype and water model

名称	原型	模型
高度(H)/mm	3 900	678
包口内径(R)/mm	4 360	758
包底内径(r)/mm	3 800	662
吹气孔位置	0.35r	0.35r
吹气孔个数/个	2	2
吹气孔夹角/°	120	120
气体种类	氩气	空气
气体密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1.78	1.29
液体种类	钢水	水
液体密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 000	1 000
液体深度/mm	3 330	578

表 2 原型和水模型底吹和顶吹气体流量方案/(m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>)Table 2 Test scheme of bottom and top gas blowing for prototype and water model/(m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>)

方案	底吹		方案	顶吹	
	原型	模型		原型	模型
D1	50	0.28	E1	50	0.28
D2	70	0.39	E2	70	0.39
D3	90	0.50	E3	90	0.50

本实验利用水模拟钢水, 机油模拟渣, 苯甲酸模拟氧元素。苯甲酸具有既溶于水又溶于机油的特性, 将其作为在互不相溶两相流体中的传递物质, 即示踪剂。通过测定溶于机油中的苯甲酸向水中的传递速率, 来考察不同条件时示踪剂在两相中的传递速率。实验中机油中溶入的苯甲酸浓度为 0.033 mol/L, 根据实验中测定得到溶解在水中苯甲酸浓度与毫伏数 (mv) 之间关系如下:

$$[C]_B = 9.19 \times 10^{-6} + 9.84 \times 10^{-6} \times v \quad (6)$$

油-水两相间传输物质传质过程总速率为:

$$\ln[(C_e - C_i)/(C_e - C_0)] = -k_a t \quad (7)$$

式中:  $v$ - 电压/mv;  $C_e$ - 与油平衡时水中苯甲酸的浓度/(mol·L<sup>-1</sup>);  $C_i$ - 不同时刻水中苯甲酸浓度/(mol·L<sup>-1</sup>);  $k_a$ - 容量传质系数/s<sup>-1</sup>;  $t$ - 时间/s。

为了更好地分析参数对苯甲酸从机油向水中的传递速度, 苯甲酸的浓度采用无因次浓度  $C_k$ :

$$C_k = \ln \frac{(C_e - C_i)}{(C_e - C_0)} \quad (8)$$

那么, 可以得到容量传质系数  $k_a$  的表达式:

$$k_a = -\frac{C_k}{t} = -\frac{\ln \frac{(C_e - C_i)}{(C_e - C_0)}}{t} \quad (9)$$

预备实验测定  $C_e$  为 0.001 456 mol/L (147 mv)。

### 1.3 实验参数确定

(1) 钢包模型参数。以 300 t 钢包为原型按照 1:5.75 建立有机玻璃模型。此部分冷态模拟实验在有机玻璃制成的钢包模型中进行。实验时保持模型与原型的几何相似, 根据实验条件和现场的最大气体流量, 确定几何相似比为 1:5.75 (表 1)。

(2) 实验方案。实验中, 先向模型注入距炉底 578 mm 高的水, 之后调节枪位、顶吹流量、底吹流量等参数。待吹气一定时间、模型内状态达到稳定后, 向熔池加入已溶解的苯甲酸的机油。加入的同时用酸度仪记录数据, 记录时间为 15 min。酸度计探头放置在熔池底部。

苯甲酸由油向水的传质速度的计算见公式 (9)。实验的底吹流量、顶吹流量和顶枪枪位的选择见表 2、表 3, 优化方案见表 4。

表 3 顶枪枪位方案

Table 3 Scheme of layout of top lance level

方案代号	对应原型尺寸/mm	模型尺寸/mm	位置说明
F1	300	52	最低处
F2	1 110	193	1/3H
F3	1 665	290	1/2H

表 4 复吹参数优化实验方案

Table 4 Test scheme for optimization of combined blowing parameters

序号	氧枪枪位/mm	顶吹流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )		底吹流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	
		模型	原型	模型	原型
(1)	-	0	-	0.39	70
(2)	-	0	-	0.67	120
(3)	-	0	-	0.78	140
(4)	底部	0.28	50	0.39	70
(5)	底部	0.39	70	0.39	70

## 2 实验结果与讨论

可采用 (1) 钢包喷粉 (IP); (2) LF 气体搅拌和 (3) 真空喷粉 (RH-PB、RH-Injection) 3 种工艺对钢水进行深脱硫<sup>[2]</sup>, 本文采用第 2 种 LF 精炼脱硫法进行试验。

根据表 4 实验方案, 进行了传质速度测定实验。从图 2 中可以看出, 纯底吹情况下: 底吹流量为 0.39 m<sup>3</sup>/h 时, 传质速度  $k_a = 0.735 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ; 底吹流量为 0.67 m<sup>3</sup>/h 时, 传质速度  $k_a = 0.925 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ; 底吹流量为 0.78 m<sup>3</sup>/h 时, 传质速度  $k_a = 1.17 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。说明随着底吹流量的增大, 传质速度逐渐增加。

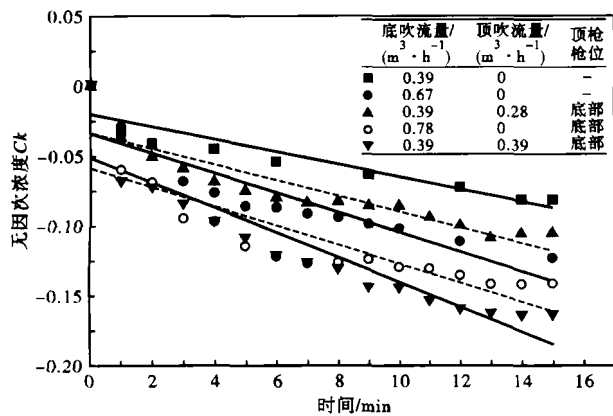


图2 传质模拟实验结果

Fig. 2 Test results of mass transfer simulation

表5 合金微调吹氩站顶底复合吹氩供气制度

Table 5 Schedule of top and bottom combined argon supplying in ladle at microalloying and gas blowing station

钢包净空高度/ mm	钢水质量/ t	流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	
		顶吹	底吹
300	285	70	70
500	300	60	60
700	315	50	50

表6 合金微调站吹氩前后炉渣成分变化,8炉

Table 6 Change of ingredient slag in ladle at microalloying station before and after argon blowing, 8 heats

吹氩	渣成分/%								碱度 (R)
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	FeO + MnO	S	
前	40.91 ~ 50.88	8.41 ~ 13.68	1.61 ~ 7.05	19.63 ~ 28.07	2.27 ~ 2.98	7.50 ~ 11.02	22.00 ~ 30.38	0.05 ~ 0.08	3.41 ~ 5.37
	46.80 ~ 55.87	7.44 ~ 13.84	18.50 ~ 32.53	1.24 ~ 3.73	0.55 ~ 1.25	3.12 ~ 6.56	1.88 ~ 4.82	0.10 ~ 0.34	3.72 ~ 6.85
平均	45.39	10.52	4.12	23.87	2.51	9.30	26.38	0.07	4.38
	50.53	10.11	26.01	2.66	0.82	5.32	3.48	0.23	5.23

表7 合金微调站前后钢水硫、氧含量变化

Table 7 Change of sulphur and oxygen content in liquid at microalloying station before and after argon blowing

编号	[O]/10 <sup>-6</sup>		[S]/%		脱硫率/ %
	吹氩前	吹氩后	吹氩前	吹氩后	
1	2.3	1.4	0.005	0.004	20.00
2	1.9	1.2	0.005	0.003	40.00
3	3.5	1.5	0.004	0.004	33.33
4	2.8	1.3	0.005	0.004	20.00
5	7.5	2.0	0.004	0.003	25.00
6	2.6	0.9	0.003	0.003	0
7	1.8	0.8	0.005	0.004	20.00
8	3.1	0.7	0.005	0.004	20.00
平均值	3.19	1.31	0.00475	0.00363	22.29

总供气流量为0.67 m<sup>3</sup>/h,纯底吹时,传质速度  $k_a = 0.925 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ;顶底复吹时(底吹流量0.39 m<sup>3</sup>/h,顶吹流量0.28 m<sup>3</sup>/h),传质速度  $k_a = 1.17 \times$

$10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ;总的供气流量为0.78 m<sup>3</sup>/h,纯底吹时,传质速度  $k_a = 1.15 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ;顶底复吹时(顶吹和底吹流量均分为0.39 m<sup>3</sup>/h),传质速度  $k_a = 1.43 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。说明在总的供气流量一定的情况下,顶底复吹传质速度大于纯底吹的传质速度;顶底吹按照50:50均分,氩气流量为0.39 m<sup>3</sup>/h时传质系数最大。

### 3 复合吹氩脱硫效果分析

根据实验结果,制定了合金微调站顶底复吹氩的供气制度(表5),采用顶底复吹预成渣工艺后,进行了8炉工业实验。合金微调站前后的顶渣变化,钢中硫、氧含量变化分别如表6、表7。

可以看出,经过合金微调站后,炉渣(FeO + MnO)含量平均值由26.38%降到3.48%;炉渣Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量平均值由4.12%升高到26.01%;炉渣碱度(R)平均值由4.38升高到5.23;炉渣硫含量平均值由0.07%升高到0.23%;钢水自由氧含量平均由  $3.19 \times 10^{-6}$  降低到  $1.31 \times 10^{-6}$ ;钢水硫含量平均由0.00475%降低到了0.00363%,平均脱硫率为22.29%。

### 4 结论

(1)总供气量相同的情况下,顶底复吹能有效增加钢渣反应界面积,从而提高传质速度;顶吹流量越大,传质速度越快。可以有效提高预成渣的速度。

(2)通过冷态模拟实验,采用顶底复合吹,顶、底吹氩流量比例为50:50,均为0.39 m<sup>3</sup>/h时,搅拌混匀效果最佳。

(3)根据水模型试验结果在马钢建立了钢包顶底吹氩装置,并进行预脱硫试验,达到良好的冶金效果:平均脱硫率为22.29%,处理后终点[S]平均为0.004%,渣中(FeO + MnO)降至3.48%。

### 参考文献

- 1 张先焯. 冶金传输原理. 北京:冶金工业出版社,1988
- 2 刘 浏. 超低硫钢生产工艺技术. 特殊钢,2000,21(5):29

朱伦才(1962-),男,高级工程师,1984年安徽工业大学毕业,主要从事冶炼工艺及产品开发的研究。

收稿日期:2011-05-30