

LF 精炼过程 100 t 钢包底吹氩卷渣水模拟研究

田罗林¹ 岳峰¹ 吴华杰¹ 李瑛² 马忠存² 李彬²

(1 北京科技大学冶金工程研究院, 北京 100083; 2 北满特殊钢有限公司, 齐齐哈尔 161041)

摘要 以钢厂 100 t 钢包为原型, 根据相似原理模型与原型 1:3.5 的比例建立水模型。试验了对应实际吹气量 31 ~ 237 L/min 不同位置单喷嘴和双喷嘴吹气对卷渣情况的影响, 发现原吹气孔位置 (距钢包中心约 0.45R) 单喷嘴、距钢包中心 0.6R 位置单喷嘴、原吹气孔位置 (约 0.45R) 双喷嘴和距中心 0.6R 位置双喷嘴吹气临界卷渣气量分别为 113、93、31、82 L/min, 因此实际精炼时软吹采用单喷嘴吹气, 合金化阶段用双喷嘴吹气为宜。回归分析得出, 单喷嘴吹气时裸露区直径 D (mm) 与底吹气量 Q (L·min⁻¹) 的关系式 $D = 43.333Q + 47.5$ (0.6 < Q < 4.6)。

关键词 100 t 钢包 底吹 吹气位置 卷渣 水模拟 裸露区

A Study on Water Modeling Simulation for Slag Entrapment in 100 t Ladle with Bottom Argon Blowing during LF Refining Process

Tian Luolin¹, Yue Feng¹, Wu Huajie¹, Li Ying², Ma Zhongcun² and Li Bin²

(1 Metallurgical Engineering Research Institute, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 Beiman Special steel Co Ltd, Qiqihaer 161041)

Abstract According to the prototype of a 100 t ladle at steelworks and based on geometric similarity principle, a water model with model and prototype ratio 1:3.5 is established. The effect of different blowing position of single nozzle and double nozzles corresponding real gas blowing rate 31 L/min to 237 L/min on conditions of slag entrapment has been tested. It is found that the critical slag entrapment blowing gas rate for the original blowing position (about distance from ladle center 0.45R) single nozzle, position distance from center of ladle 0.6R single nozzle, original blowing position (about 0.45R) double nozzles and position distance from center of ladle 0.6R double nozzles gas blowing is respectively 113, 93, 31 and 82 L/min, therefore during real refining process it is available to using single nozzle blowing for soft gas blowing and to using double nozzles blowing for alloying stage. By regression analysis the relation formula between diameter of single nozzle blowing exposed area D (mm) and bottom gas blowing rate Q (L·min⁻¹) is $D = 43.333Q + 47.5$, as 0.6 < Q < 4.6.

Material Index 100 t Ladle, Bottom Blowing, Gas Blowing Position, Slag Entrapment, Water Model, Exposed Area

在实际 LF 精炼过程中, 往往发现在不正常的喷吹操作下, 钢中因为顶渣混卷而出现等于或接近顶渣成分的大颗粒夹杂物, 钢质反而被污染^[1], 所以, 确定合理的底吹气量对于提高钢的品质具有十分重要的作用^[2-8]。本文通过对 100 t 钢包模型卷渣现象的研究, 确定了实际生产中软吹时较为合理的底吹气量。

1 实验原理

按照 1:3.5 比例用有机玻璃制成模型 (表 1)。渣和钢液接触界面处, 主要作用力包括渣和钢液的表面张力以及渣的重力, 所以, 为保证模型与原型的动力学相似, 需使得原型与模型的 Fr 准数^[9] 和 We 准数^[1] 相等: $Fr_{原} = Fr_{模}$; $We_{原} = We_{模}$ 。

$$\text{即 } \frac{u_{st}^2}{gH_{原}} = \frac{u_w^2}{gH_{模}} \quad (1)$$

表 1 钢包实际与模型尺寸/mm

Table 1 Size of ladle for prototype and model /mm

项目	钢包			100 t
	上口直径	下口直径	高度	液位高度
原型	2 970	2 600	3 710	2 450
模型	848	743	1 060	700

$$\frac{\rho_{st} u_{st}^2}{\sqrt{g\sigma_{st-sl}(\rho_{st} - \rho_{sl})}} = \frac{\rho_w u_w^2}{\sqrt{g\sigma_{w-o}(\rho_w - \rho_o)}} \quad (2)$$

式中: u_{st} 、 u_w - 钢液和水的速度/(m·s⁻¹); g - 重力加速度/(m·s⁻²); $H_{原}$ 、 $H_{模}$ - 原型和模型的熔池深度/m; ρ_{st} 、 ρ_{sl} 、 ρ_w 、 ρ_o - 钢液、渣、水和油的密度/(kg·m⁻³); σ_{st-sl} 、 σ_{w-o} - 钢液/渣、水/油之间界面张力/(N·m⁻¹)。

根据式(1)、(2)推导出油密度的计算式如下:

$$\rho_o = \rho_w - \frac{\sigma_{st-sl}}{\sigma_{w-o}} \cdot \frac{\rho_w^2}{\rho_{st}} \cdot \frac{1}{\lambda^2} \cdot (\rho_{st} - \rho_{sl}) \quad (3)$$

式(3)中,取钢液密度 $\rho_{st}=7\,000\text{ kg/m}^3$,渣密度 $\rho_{sl}=3\,500\text{ kg/m}^3$,水密度 $\rho_w=1\,000\text{ kg/m}^3$,钢液/渣之间的界面张力 $\sigma_{st-sl}=1\,220\text{ N/m}$,水/油之间界面张力 $\sigma_{w-o}=44\text{ N/m}$,原型与模型比例 $\lambda=3.5$,计算得出模拟用油的密度 $\rho_o=838\text{ kg/m}^3$ 。

将密度约为 800 kg/m^3 的煤油与密度约为 870 kg/m^3 的液压油按1:1比例混合可配得密度接近计算油密度的混合油。按照 20 kg/t 钢的渣量计算得出,实际冶炼过程中的渣层厚度为 89.7 mm ,对应的模型油层厚度为 25.63 mm ,实验过程中,取油层厚度为 25 mm ,对应的实际渣层厚度为 87.5 mm 。

2 实验方案

主要实验钢包在原吹气位置单喷嘴吹气、距离中心 $0.6R$ 位置单喷嘴吹气、原吹气位置双喷嘴吹气和距离中心 $0.6R$ 两喷嘴呈 120° 这4种工况下的卷渣情况,其中原吹气喷嘴与钢包模型底部中心的间距为 165.4 mm (对应的实际距离为 578.9 mm), $0.6R$ 位置与钢包底部中心的间距为 222.9 mm (对应的实际距离为 780.15 mm),如图1所示。

实验气量与实际气量的对应关系通过原型与模型修正弗鲁德准数 Fr' 相等^[7]得出的关系式为:

$$Q_{\text{模型}}=0.0194 Q_{\text{原型}} \quad (4)$$

式中: $Q_{\text{模型}}$ 、 $Q_{\text{原型}}$ -模型和原型吹气量/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$ 。

实验中底部吹气量从 0.4 L/min (对应实际吹气量 21 L/min)开始,每次增加 0.2 L/min (10.3 L/min),直到混卷发生十分严重结束。

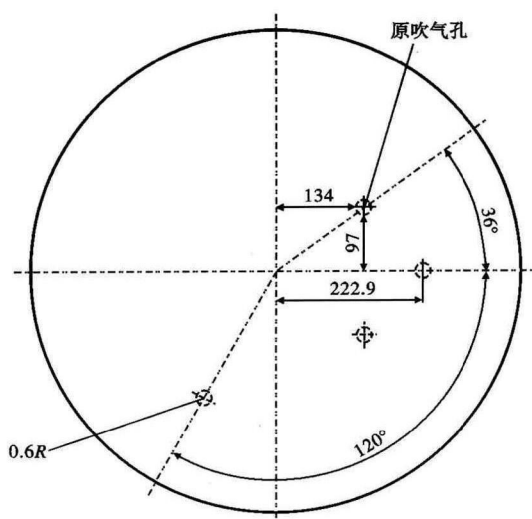


图1 卷渣实验吹气位置示意图

Fig.1 Schematics of gas blowing positions in slag entrapment simulation test

3 实验结果与讨论

3.1 卷渣发展过程

在不同位置吹气时,随着气量的增加,油水界面变化的情形基本相同,只不过在不同位置吹气,发生某一现象所对应的气量不相同。以原吹气孔位置吹气为例,吹气量为0时,油层静止浮在水面上,从钢包底部开始吹气时,会出现一裸露区域,此区域随着吹气量的上升而逐渐增大,并且油形成的波浪波高随着吹气量的增加而逐渐增大,但当气量到达 2.2 L/min (对应的实际吹气量为 113 L/min)时,从波浪的顶部开始分离出一些小油滴,这些油滴分离后并未完全进入水中,而是马上回归油层,一般将这一吹气量作为卷渣开始的临界气量。吹气量到达 4 L/min (对应实际吹气量 206 L/min)时,已经产生大量油滴,且这些油滴能运动到较深的位置;当吹气量到达 4.6 L/min (237 L/min)时,产生的油滴已经无法返回油层。

3.2 不同工况卷渣情况对比

从表2中可以看出,单喷嘴吹气时,距中心 $0.6R$ 位置比原吹气孔位置的临界卷渣气量要更小,

表2 不同工况条件下开始卷渣的临界气量/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$
Table 2 Critical gas blowing rate of slag entrapment with different conditions $/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$

项目	单喷嘴		双喷嘴	
	原吹	0.6R	原吹	0.6R-120°
实验	2.2	1.8	0.6×2	1.6×2
实际	113.0	93.0	31×2	82×2

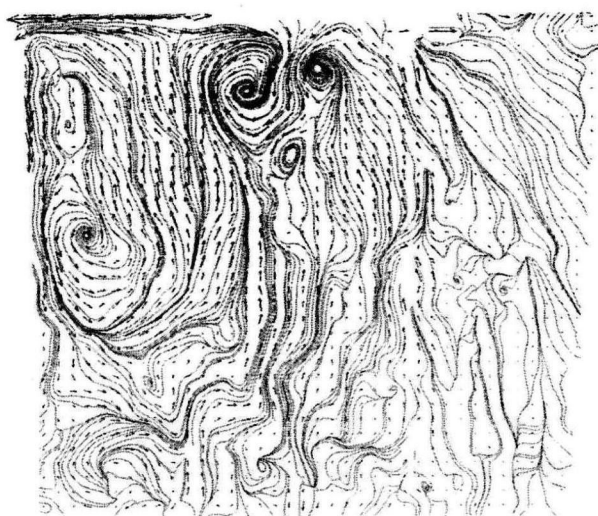


图2 $0.5R-120^\circ$ 位置吹气量为 $1.0 \times 2\text{ L/min}$ 时粒子图像测速实验流场图

Fig.2 Flow field diagram captured by particle image velocimetry test, gas blowing rate $1.0 \times 2\text{ L/min}$, at position $0.5R-120^\circ$

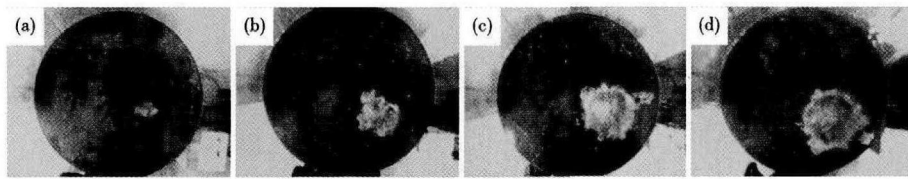


图 3 原吹气孔位置单喷嘴吹气不同吹气量时裸露区形貌,吹气量/(L·min⁻¹):(a)0.6;(b)2.2;(c)4.0;(d)4.6

Fig.3 Morphology of exposed area of original single nozzle gas blowing with different gas blowing rate/(L·min⁻¹):(a)0.6;(b)2.2;(c)4.0 and (d)4.6

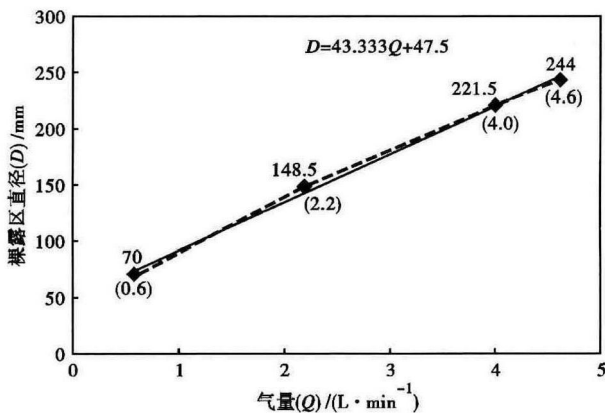


图 4 原单孔吹气位置裸露区直径与吹气量关系图

Fig.4 Diagram of relation between diameter of exposed area and gas blowing rate for original single nozzle blowing position

说明在距中心 0.6R 位置吹气更容易发生卷渣。另外,原吹气孔位置双喷嘴吹气时,发生卷渣的气量较之其它的 3 个工况都要小得多,这是因为,原吹气位置的两个吹气喷嘴距离较近,导致从两个裸露区处水平流动的水产生交汇,水由水平流动变为竖直向下流动,从而更容易将油带入水中,这点从图 2 可以得到证明。图 2 为通过 PIV (Particle Image Velocimetry, 粒子图像测速技术) 实验测出的 0.5R-120° 位置吹气量为 1.0 × 2 L/min 时,平行于两吹气喷嘴中心连线且通过钢包模型中心的面上流场图,为避免在较小的气量条件下发生卷渣,在双喷嘴吹气时,应保证两个吹气喷嘴的距离不要太近。

3.3 吹气量对裸露区面积的影响

根据在钢包模型的顶部拍摄不同气量下油层表面裸露区的大小(图 3a~d),通过软件处理计算出原吹气孔位置单嘴吹气裸露区的直径如图 4 所示,在吹气量 0.6~4.6 L/min,裸露区直径(D)与底吹气量(Q)呈现出线性关系,回归所得关系式为:

$$D = 43.333 Q + 47.5 \quad (0.6 < Q < 4.6) \quad (5)$$

式中:D-裸露区直径/mm;Q-底吹气量/(L·min⁻¹)。

相同吹气量条件下,0.6R 位置单嘴吹气与原吹气孔位置吹气所形成的裸露区直径大小基本相同,所以式(5)对于距中心 0.6R 位置处吹气裸露区直径的计算也适用。

4 结论

(1)原吹气孔位置单喷嘴吹气的临界卷渣气量为 2.2 L/min (对应实际气量 113 L/min),距中心 0.6R 位置单喷嘴吹气的临界卷渣气量为 1.8 L/min (对应实际气量 93 L/min),双喷嘴吹气时吹气量在 0.6 L/min 时便发生卷渣,所以,为避免卷渣应保证两吹气喷嘴之间相隔一定距离。

(2)由于单喷嘴吹气时的临界卷渣气量大于双喷嘴吹气时的临界卷渣气量,所以建议实际生产时软吹采用单喷嘴吹气,合金熔化阶段选择双喷嘴吹气。

(3)单喷嘴吹气时,在吹气量 0.6~4.6 L/min 裸露区直径与底吹气量呈现出线性关系,裸露区直径 $D = 43.333 Q + 47.5 (0.6 < Q < 4.6)$ 。

中央高校基本科研业务费专项资金 (FRF-TP-12-138A)

参考文献

- [1] 朱苗勇,肖泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟[M]. 北京:冶金工业出版社,1998:223-227.
- [2] 肖泽强,彭一川. 喷吹钢包中渣金卷混现象的数学模拟及其应用[J]. 钢铁,1989,24(10):17-21.
- [3] 成国光,张 鉴,佟福生,等. 钢包底吹氩搅拌卷渣机理的水模型研究[J]. 钢铁研究,1994,2(2):3-7.
- [4] Jonsson L, Jonsson P. Modeling of Fluid Flow Conditions around the Slag/Metal Interface in a Gas-Stirred Ladle[J]. ISIJ International, 1996,36(9):1127-1134.
- [5] 艾新港,包燕平,吴华杰,等. 钢包底吹氩卷渣临界条件的水模型研究[J]. 特殊钢,2009,30(2):7-9.
- [6] 孙丽媛,李京社,唐海燕,等. 150 t 钢包底吹氩卷渣行为的物理模拟[J]. 特殊钢,2013,34(5):13-16.
- [7] Iguchi M, Sumida Y, Okada R, et al. Evaluation of Critical Gas Flow Rate for the Entrapment of Slag using a Water Model[J]. ISIJ International, 1994,34(2):164-170.
- [8] Kim S, Fruehan R J, Guthrie R I L. Physical Model Studies of Slag/Metal Reactions in Gas Stirred Ladles. Determination of Critical Gas Flow Rate[J]. Iron & Steelmaker, 1993,20(11):71-76.
- [9] 王建军,包燕平,曲 英. 中间包冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社,2001:20.

田罗林(1989-),男,硕士研究生(北京科技大学),2012年北京科技大学(本科)毕业,转炉模型研究,LF精炼模型研究. E-mail:tianluolin_ustb@163.com

收稿日期:2014-04-10