

## 钢包底吹氩卷渣临界条件的水模型研究

艾新港 包燕平 吴华杰 马鑫

(北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘要** 以钢厂 70 t 钢包为原型, 建立模型与原型尺寸比为 1:2.75 的水模型。通过水模型实验对钢包临界卷渣吹氩量进行测量, 得到临界卷渣气量是 450 L/min。实验测量不同吹气量下钢包液面水平流速, 分析水平流速与钢包卷渣的关系, 得到钢包临界卷渣的液面流速为 0.652 m/s、韦伯准数为 6.967。讨论了采用临界卷渣韦伯准数计算临界卷渣液面流速, 通过测量达到临界卷渣液面流速时的吹氩量, 来确定临界卷渣吹氩量的方法。

**关键词** 底吹氩 临界卷渣 水模型 韦伯准数

## A Study on Water Modeling of Ladle with Bottom Argon Blowing in Critical Slag Entrapment Condition

Ai Xingang, Bao Yanping, Wu Huajie and Ma Xin

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

**Abstract** According to a 70 t ladle prototype at steel works, the water model with model-prototype linear scale ratio 1:2.75 has been established. The obtained critical blowing gas rate was 450 L/min by water modeling test to measure the rate of ladle bottom blowing argon in critical slag entrapment condition. The horizontal flow velocity of liquid surface in ladle with different gas blowing rate was measured in test to analyze the relation between horizontal flow velocity and liquid entrapped slag in ladle and get the liquid surface flow rate in critical slag entrapment condition being 0.652 m/s and its Weber index in that condition being 6.967. Using critical Weber index to calculate liquid surface flow velocity in critical slag entrapment condition and method to define the argon blowing rate for critical liquid entrapped slag by measuring the argon blowing rate up to liquid surface flow rate in critical slag entrapment condition are discussed in this paper.

**Material Index** Bottom Argon Blowing, Critical Entrapped Slag, Water Model, Weber Index

冶金工作者对钢包底吹氩渣钢界面现象进行了大量研究工作<sup>[1-5]</sup>, 本文在水模型实验基础上系统研究钢包底吹氩卷渣临界条件。

### 1 实验方法

#### 1.1 实验原理和设备

渣钢界面流动状态, 主要受到液体表面张力影响, 除了应满足几何相似和动力学中的  $Fr$  准数相等外, 还要保证动力学中的  $We$  准数相等<sup>[6]</sup>。

$$Fr'_{模型} = Fr'_{原型} \quad (1)$$

$$\text{即: } \frac{\rho_{\text{氧气}} \cdot V_{\text{水}}^2}{\rho_{\text{水}} \cdot g \cdot H_{模型}} = \frac{\rho_{\text{氧气}} \cdot V_{\text{钢}}^2}{\rho_{\text{钢}} \cdot g \cdot H_{原型}} \quad (2)$$

式中:  $V_{\text{钢}}$ 、 $V_{\text{水}}$  分别为钢液、水的流速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\rho_{\text{氧气}}$ 、 $\rho_{\text{水}}$ 、 $\rho_{\text{钢}}$  分别为空气、氧气、水和钢液密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $H_{模型}$ 、 $H_{原型}$  分别为模型、原型的熔池深度/m;  $g$  重力加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )。

$$We_{模型} = We_{原型} \quad (3)$$

$$\text{即: } \frac{\rho_{\text{水}} V_{\text{水}}^2}{\sqrt{g \sigma_{\text{水-油}} (\rho_{\text{水}} - \rho_{\text{油}})}} = \frac{\rho_{\text{钢}} V_{\text{钢}}^2}{\sqrt{g \sigma_{\text{钢-渣}} (\rho_{\text{钢}} - \rho_{\text{渣}})}} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_{\text{钢-渣}}$ 、 $\sigma_{\text{水-油}}$  分别为钢渣、水油界面张力/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $\rho_{\text{渣}}$  熔渣密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $g$  重力加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )。

以钢厂 70 t 钢包为原型, 按模型与原型为 1:2.75 的相似比制作有机玻璃模型(表 1)。

表 1 钢包实际尺寸和模型尺寸/mm

Table 1 Ladle size of prototype and model/mm

类别	钢包			钢水装入深度
	深度	上部内径	下部内径	
实际	2 840	2 636	1 887	2 490
模型	1 032.7	958.5	686.2	905.5

#### 1.2 模拟介质的选取

表 2 为水和钢液的物理性能。实验选用轻质油

表 2 水和钢液的物理性能

Table 2 Physical properties of water and liquid steel

物质	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	表面张力/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	运动粘度/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
20 °C 水	998	0.073	$1.0 \times 10^{-6}$
1 600 °C 钢液	7 014	1.600	$0.9 \times 10^{-6}$

和真空泵油的混合油模拟精炼渣,轻质油和真空泵油密度分别为  $620、884 \text{ kg/m}^3$ ,通过改变轻质油和真空泵油的配比来调节油密度。由(2)式可以得到:

$$\frac{V_{\text{水}}^2}{V_{\text{钢}}^2} = \frac{\rho_{\text{Ar}} \cdot \rho_{\text{水}} \cdot H_{\text{模型}}}{\rho_{\text{空气}} \cdot \rho_{\text{钢}} \cdot H_{\text{原型}}} = \frac{\rho_{\text{Ar}} \cdot \rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{空气}} \cdot \rho_{\text{钢}}} \cdot \lambda \quad (5)$$

由(4)式可以得到模拟所需油的密度:

$$\rho_{\text{油}} = \rho_{\text{水}} - \frac{\rho_{\text{Ar}}^2 \cdot \rho_{\text{水}}^4 \cdot \sigma_{\text{钢-渣}}^2}{\rho_{\text{空气}}^2 \cdot \rho_{\text{钢}}^4 \cdot \sigma_{\text{水-油}}^2} \cdot \lambda^2 \cdot (\rho_{\text{钢}} - \rho_{\text{渣}}) \quad (6)$$

取  $\sigma_{\text{水-油}} = 44 \text{ N/m}$ ,  $\sigma_{\text{钢-渣}} = 1220 \text{ N/m}$ ,

$$\rho_{\text{渣}} = 3400 \text{ kg/m}^3, \rho_{\text{钢}} = 7000 \text{ kg/m}^3, \lambda = \frac{1}{2.75},$$

$$\frac{\rho_{\text{Ar}}}{\rho_{\text{空气}}} = \frac{40}{29}, \frac{\rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{钢}}} = \frac{1}{7}。计算得出: \rho_{\text{油}} = 709 \text{ kg/m}^3。$$

轻质油和真空泵油配比为2:1时可以满足模型与原型的  $We$  准数相等,实验使用这种配比的混合油。按几何相似原理,实验油层厚度与实际渣层厚度保持为1:2.75比例。实际生产渣层厚度为120 mm左右,实验油层厚度取30 mm。

### 1.3 底吹气量和临界卷渣吹气量的确定

实验用氧气模拟氩气,按照修正  $Fr$  准数换算模型的吹气量<sup>[6]</sup>。  $Q_{\text{模型}} = 0.0315Q_{\text{原型}}$

计算的现场与实验室吹气量的对应关系见表3。

表3 实际与实验室吹气量/(L·min<sup>-1</sup>)

Table 3 Blowing gas rate for commercial and modeling / (L·min<sup>-1</sup>)

实际	实验室
100	3.15
200	6.30
300	9.45
400	12.60
450	14.18
500	15.75
600	18.90

为了确定临界卷渣的条件,不同吹气量下用直尺测量油被带入水中的深度。采用目测观察不同吹气量下钢渣界面情况,开始出现油滴脱离油层进入水中的吹气量为临界卷渣吹气量并照相记录。

### 1.4 钢包液面流速的测量方法

实验在不加入油的情况下,直接测量钢包底吹气时钢包液面的表面流速。钢包液面流速采用 LGY-II 智能流速仪测量。测量位置选择在钢包液面隆起的边缘,每个底吹气量条件下测量10个有效数据,数据采集时间为5 s,选取测量结果的最大值为该工况下的钢包液面最大流速。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 卷渣的定性描述

在钢包底部吹入氧气,造成油层下水的水平流动,用以模拟钢包底吹氩时气液区顶部渣钢界面的状态。吹气孔位置在距离钢包底部圆心0.65 r的位置,实验模拟了不同吹气量下的油水界面情况,当吹气量由小增大时,油水界面由平静接触、起浪、卷混开始形成到卷混大量出现(图1)。

### 2.2 临界卷渣吹气量

由图2(a)可见,吹气量小于450 L/min时,油被水流带入水中的深度随着吹气量的增加缓慢增加,这时没有出现油滴;吹气量为450 L/min时,油在水中的深度突然增加,此时开始生成油滴并被水流带入钢包内;当吹气量大于450 L/min时,油在水中的深度随着吹气量增加显著。吹气量为450 L/min时油在水中深度发生突变,卷混的临界吹气量是450 L/min。吹气量小于450 L/min才能避免卷渣。

### 2.3 临界卷渣液面流速

由图2(b)可见,钢包液面流速随吹气量增加成线性增加,吹气量达到450 L/min时钢包卷渣临界液面流速为0.652 m/s。

### 2.4 临界卷渣韦伯准数

决定液/液体系卷混的主要参数是韦伯数,钢渣卷渣的临界韦伯准数:

$$We = \frac{Fs}{\sqrt{F_g F}} = \frac{\rho_{\text{钢}} V_{\text{钢}}^2}{\sqrt{g \sigma_{\text{钢-渣}} (\rho_{\text{钢}} - \rho_{\text{渣}})}} \quad (7)$$

式中:  $\sigma_{\text{钢-渣}} = 1.22 \text{ N/m}$ ,  $\rho_{\text{钢}} = 7000 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{渣}} = 3400 \text{ kg/m}^3$ 。由(7)式计算得到的图2(c)可见,韦伯准数随着吹气量的增加而显著增加,当吹气量为450 L/min时,开始发生卷渣的钢水临界韦伯准数为  $We = 6.967$ 。

### 2.5 临界卷渣条件的讨论

钢包底吹氩精炼卷渣时钢渣界面的传质速率是不卷渣时的几倍<sup>[7]</sup>,在生产纯净钢的时候应严格防止卷渣。吹氩量必须控制在临界卷渣气量以下,在钢水不裸露的前提下,保证吹氩强度。

钢包卷渣临界韦伯准数为确定临界卷渣吹氩量提供了另外一种水模型实验方法。可以先利用临界卷渣韦伯准数计算卷渣的临界液面流速,然后直接测量该流速下对应的吹氩量,进而确定临界卷渣吹氩量。这种实验方法不再需要模拟渣钢界面来确定临界卷渣气量,同时对于其他操作条件(非底吹氩)

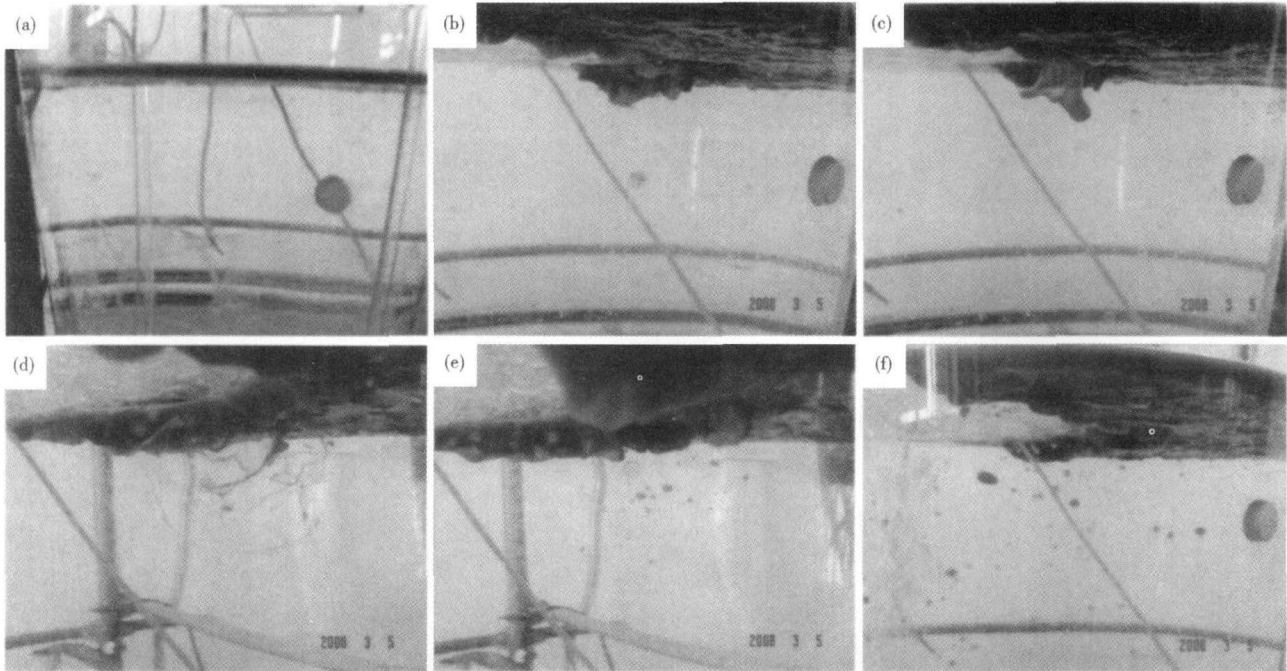


图 1 卷渣过程:平静接触(a),起浪(b),卷混开始形成 1(c),开始形成 2(d),开始形成 3(e),卷混大量出现(f)  
 Fig. 1 Entrapped slag process: Undisturbed contact (a); Waviness (b); Entrapped oil initiating 1 (c), initiating 2 (d) and initiating 3 (e); Large amount of entrapped oil occurred (f)

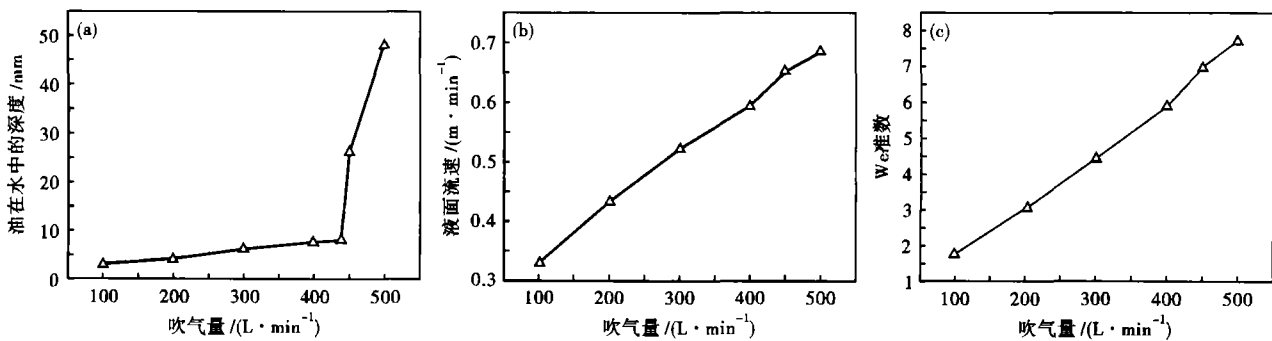


图 2 (a) 油在水中的深度与吹气量的关系; (b) 钢包液面水平流速与吹气量的关系; (c) Weber 准数与吹气量的关系  
 Fig. 2 (a) Relation between depth in water of oil and gas blowing rate; (b) Relation between liquid surface flow velocity and gas blowing rate; (c) Relation between Weber index and gas blowing rate

造成的钢水表面流速过大而形成的卷渣也适用。

### 3 结论

(1) 水模型的油被水流带入水中的深度,在临界吹气量为 450 L/min 时发生突变。要避免卷渣,吹气量必须小于 450 L/min。

(2) 钢包液面流速随着吹气量的增加而成线性增加,钢包临界卷渣液面流速为 0.652 m/s。

(3) 韦伯准数随着吹气量的增加而显著增加,临界卷渣韦伯准数为 6.967。

#### 参考文献

1 成国光,张 鉴. 钢包底吹氩搅拌卷渣机理的水模型研究. 钢铁研究,1994,2(2):3

2 肖泽强,彭一川. 喷吹钢包中渣金卷混现象的数学模化及其在应用. 钢铁,1989,24(14):17  
 3 Jonsson L, Joensson P. Modeling of Fluid Flow Conditions Around the Slag/Metal Interface in a Gas-stirred Ladle. ISIJ,1996,36:1127  
 4 曲 英,杨 健,徐保美. 熔渣下金属熔池流动现象的数学模拟. 金属学报,1991,26(3):157  
 5 彭一川,肖泽强. 卷油现象的理论和实验研究. 化工冶金,1988,9(1):71  
 6 朱苗勇,肖泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟. 北京:冶金工业出版社,1998  
 7 张化书,肖泽强. 钢/渣混合状态对冶金速率的影响. 钢铁,1987,22(1):22

艾新港(1978-),男,博士生,二次精炼技术研究。

收稿日期:2008-09-01