

210 t RH 精炼过程夹杂去除和卷渣的物理模拟

迟云广¹ 沈巧珍¹ 吴翌环¹ 彭明耀² 肖尊湖²

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;

2 华菱涟源钢铁有限公司, 娄底 417009)

摘要 通过几何相似比1:4的水模型,研究了钢厂 210 t RH 精炼的处理时间、驱动气体流量、真空度、气孔数和浸入深度对夹杂物去除的影响以及底吹方式和气体流量对卷渣量的影响。模拟试验结果表明,处理 24 min 可去除约 90% 夹杂物,真空室下降时双透气砖短时间里吹氩气可明显减少钢液卷渣量。得出 210 t RH 精炼合适的工艺参数为驱动气体流量 164.2 m³/h,气孔数 8 个,浸入深度 500 mm,真空室绝对压力 4 000 Pa;双透气砖吹氩总流量为 90 m³/h。

关键词 210 t RH 精炼 夹杂物 卷渣 水模型

Physical Simulation of Inclusion Removal and Slag Entrapment in 210 t RH Refining Process

Chi Yunguang¹, Shen Qiaozhen¹, Wu Zhaohuan¹, Peng Mingyao² and Xiao Zunhu²

(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Lianyuan Iron and Steel Company, Loudi 417000)

Abstract Effect of steel works 210 t RH refining treatment time, driving gas flow rate, vacuum, number of stomata and immersion depth on inclusion removal and the effect of bottom-blowing pattern and gas flow rate on amount of slag entrapment have been studied by using geometric similarity ratio 1:4 water model. Simulation test results show that the inclusions in liquid decrease by ~90% as treatment for 24 min and at vacuum chamber descending the short term bottom argon blowing by double porous brick is obviously available to decrease the amount of slag entrapment in liquid. It is obtained that suitable process parameters for 210 t RH refining are driving gas flow rate- 164.2 m³/h, 8 stomata, immersion depth- 500 mm, absolute pressure in vacuum chamber- 4 000 Pa and double porous brick total argon blowing flow rate- 90 m³/h.

Material Index 210 t RH Refining, Inclusion, Slag Entrapment, Water Model

RH 是一种对钢液进行循环处理的真空精炼装置,目前 RH 去除夹杂的研究^[1-5]多数是在工业实验^[3,4]和数学描述方面^[5]。夹杂去除实验采用邻苯二甲酸二丁酯模拟钢液中的夹杂物,该乳状液滴不被水润湿,在水中碰撞形成簇状物的过程和钢液中夹杂物碰撞形成簇状物的过程十分相似。本实验用混合油模拟渣,通过物理模拟实验的方法研究 210 t RH 卷渣情况,寻找减少夹杂的途径。

1 实验

1.1 实验原理

根据相似理论,RH 吹氩驱动液体的过程主要靠气体的浮力,实验中满足原、模型的几何相似和动力相似即可认为二现象相似。

本实验中模型与原型的几何相似比为1:4。动力相似要满足原型与模型的修正弗鲁德准数相等。

$$Fr'_{水} = Fr'_{钢} \quad (1)$$

$$\text{即} \quad \frac{\rho_{空} \cdot u_{水}^2}{\rho_{水} \cdot g \cdot H_{水}} = \frac{\rho_{氩} \cdot u_{钢}^2}{\rho_{钢} \cdot g \cdot H_{钢}} \quad (2)$$

式中: $u_{钢}$ 、 $u_{水}$ - 钢液、水的流速/(m·s⁻¹); $\rho_{钢}$ 、 $\rho_{水}$ - 钢液、水的密度/(kg·m⁻³); $\rho_{氩}$ 、 $\rho_{空}$ - 氩气和空气的密度/(kg·m⁻³); g - 重力加速度/(m·s⁻²); H - 真空室内钢液熔池深度/m。

根据式(1)和(2),并对气体密度进行修正后得到气体体积流量转换公式:

$$\frac{Q_{模}}{Q_{原}} = \sqrt{\lambda^5 \left(\frac{\rho_{氩}}{\rho_{空}} \right) \left(\frac{\rho_{水}}{\rho_{钢}} \right) \left(\frac{T_{钢}}{T_{水}} \frac{P_{氩}}{P_{空}} \right)} \quad (3)$$

式中: $Q_{模}$ 、 $Q_{原}$ - 模型实际状态、原型标准状态下气体的体积流量/(m³·h⁻¹); $\rho_{氩}$ 、 $\rho_{空}$ - 氩气、空气的密度/(kg·m⁻³); $\rho_{水}$ 、 $\rho_{钢}$ - 水、钢液的密度/(kg·

m^{-3}); $T_{\text{钢}}、T_{\text{水}}$ - 钢液和水的温度/K; $P_{\text{空}}、P_{\text{氩}}$ - 模型和原型吹入气体的压力/Pa; λ - 模型和原型的几何相似比。

1.2 实验设备和方法

1.2.1 夹杂去除实验

实验装置如图1,向钢包内加满密度略大于夹杂的盐水,打开真空泵,供驱动气体,使真空室降到要求的深度,调节真空,整个RH工作正常后,由水模型实验装置图中的水箱从钢包底部中心位置缓缓注入与钢包内密度相同的盐水,加满之后,控制水阀大小使溢出的与补充的溶液体积相等,随着溢出的

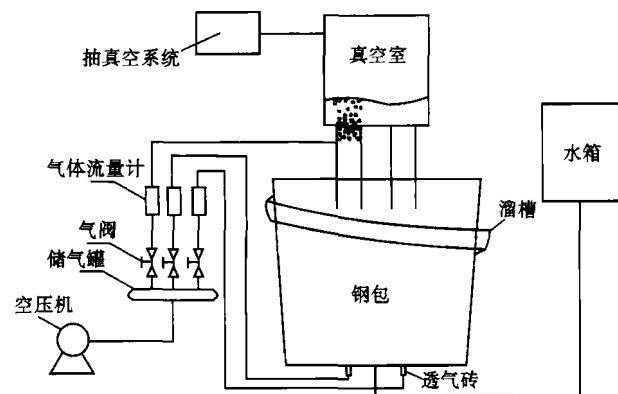


图1 水模型实验装置示意图

Fig.1 Schematics of water model test apparatus

液体,钢包内上浮至表面的乳状液随之溢出,每隔一定时间经溜槽收集溢出的乳状液和盐水的混合物,通过一定的方法得到纯乳状液,某一时刻夹杂物去除率的计算式^[1]为:

$$\eta_k = \frac{\sum_{i=1}^k V_{t_i}}{V_0}$$

式中: η_k - 前 k 次时间段内夹杂去除率之和; t_i - 第 i 个时间间隔; V_0 - 初始加入的乳状液的体积; V_{t_i} - 第 i 个时间间隔内去除的乳状液体积。每次实验处理 24 min,每隔 1 min 记录一次夹杂去除量。

1.2.2 卷渣实验

实验装置如图1所示。实验中用混合油模拟渣,用水模拟钢液。先将底吹打开,驱动气体调节到实验要求气量,待渣的吹开面积稳定之后,降真空室到指定浸入深度,关闭底吹阀门,调节真空度到实验要求真空度,待稳定之后,由包底部向包内迅速注入水,使液面的渣快速溢出,溢出结束后,使RH停止工作,收集并称量钢包内剩余的渣,即为参与循环、卷入溶液中的渣量。

1.2 实验方案

夹杂去除的实验方案如表1所示,驱动气体流量选取5个水平,浸入深度和气孔数选取3个水平,

表1 夹杂去除实验方案
Table 1 Scheme for inclusion removal test

实验方案	驱动气体流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)		气孔数/个	浸入深度/mm		真空度/Pa	
	模型	原型		模型	原型	模型	原型(绝对压力)
I	3.0/3.5/4.0/4.5/5.0	109.5/127.7/146/164.2/182.5	16	150	600	3 616	67
II	4.0	146	4/8/16	150	600	3 616	67
III	4.0	146	16	100/125/150	400/500/600	3 616	67
IV	4.0	146	16	150	600	3 475/3 616	4 000/67

表2 不同卷渣实验方案的单孔气体流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)
Table 2 Single stomata gas flow rate with different slag entrapment scheme/($m^3 \cdot h^{-1}$)

包底不吹气体	包底单透气砖吹气	包底双透气砖吹气
0	0.4	0.4
0	0.75	0.75
0	1.25	1.25
0	1.5	1.5

真空度选取2个水平。卷渣实验方案如表2所示。

2 实验结果与分析

2.1 夹杂去除率的影响因素

2.1.1 驱动气体流量和处理时间

图2、3是在浸入深度为150 mm、气孔数为16、

气泡行程为350 mm、真空度为3 616 Pa的条件下,夹杂去除率与驱动气体流量、处理时间的关系曲线。

由图2可见,夹杂去除率随着驱动气体流量的增大有一个最佳值。当驱动气体流量过小时,钢液循环流量很小,对熔池的搅拌程度弱,不利于夹杂物的碰撞长大,也不利于夹杂物向渣钢界面传输。因此,当驱动气体流量很小时,去夹杂效果较差,随着驱动气体流量的不断增加,循环流量逐渐增大,增强了熔池的搅拌,加速了传质,有利于夹杂物的碰撞长大和去除,去除夹杂的效果明显提高;随着驱动气体流量的进一步增大,去夹杂效果逐渐变差,这是因为驱动气体对钢液的搅拌作用过强,钢包内大量的钢液参与循环流动,夹杂随着钢液快速流动而难于分离。

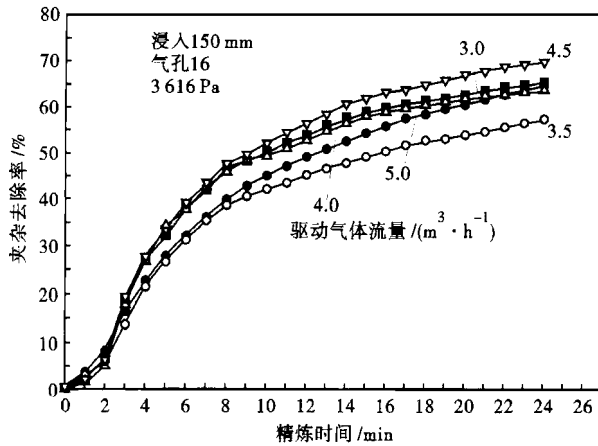


图 2 夹杂去除率与驱动气体流量的关系

Fig. 2 Relation between inclusion removal rate and driving gas flow rate

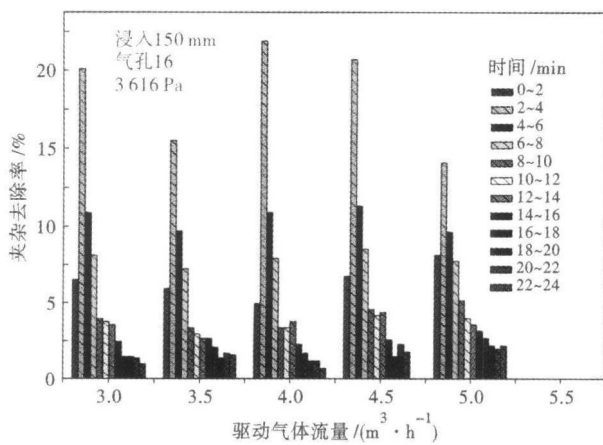


图 3 不同驱动气体流量下夹杂去除率与精炼时间的关系
Fig. 3 Relation between inclusion removal rate and refining time with different driving gas flow rate

由图 3 可知,在所有驱动气体流量的条件下,前 8 min 内夹杂去除量是最大的。8~24 min 去除量越来越小,而在 2~8 min 夹杂的单位时间去除率最

大。0~2 min 内,由于夹杂物的数量多且密集,夹杂物之间很容易发生碰撞而长大形成簇状物。2~8 min,前 2 min 形成的簇状物作为核心继续碰撞长大,并在自身浮力和钢液循环流动过程中上浮去除,去除速度最快。12~24 min 内,由于大量夹杂已被去除,剩余的主要为细小夹杂物,夹杂物之间碰撞长大越来越困难,夹杂的去除率也越来越低。大部分夹杂在 24 min 内已经基本去除。

2.1.2 浸入深度

由图 4(a)可知,夹杂的去除率与浸入深度之间的关系有一个合适的值。本实验中,浸入深度为 125 mm 时夹杂去除率最好。浸入深度不同,循环流量就会不同,对熔池造成的扰动也不一样。浸入深度太小,循环流量很小,对熔池造成的扰动程度很小,不利于夹杂碰撞形成簇状物,因此夹杂的去除率很低。浸入深度太大时,循环流量大,碰撞长大的夹杂物还没有来得及去除而被再次卷入钢液中,所以夹杂去除的效果也很差。合理的循环流量使钢液扰动情况更加有利于夹杂的碰撞长大和上浮去除,因此合理的浸入深度有利于夹杂去除。

2.1.3 气孔数

由图 4(b)可知,夹杂的去除率与气孔数之间的关系存在一个最佳值。本实验中,8 个孔数的夹杂去除率是最大的,单位时间的去除率也是最大的。孔数的变化相当于总驱动气体流量的变化,孔数越多,总驱动气体流量越大;由驱动气体的实验可知,存在一个使夹杂去除率最大的驱动气体流量最佳值,即气孔数存在一个最佳值,使得夹杂去除效果最好。

2.1.4 真空度

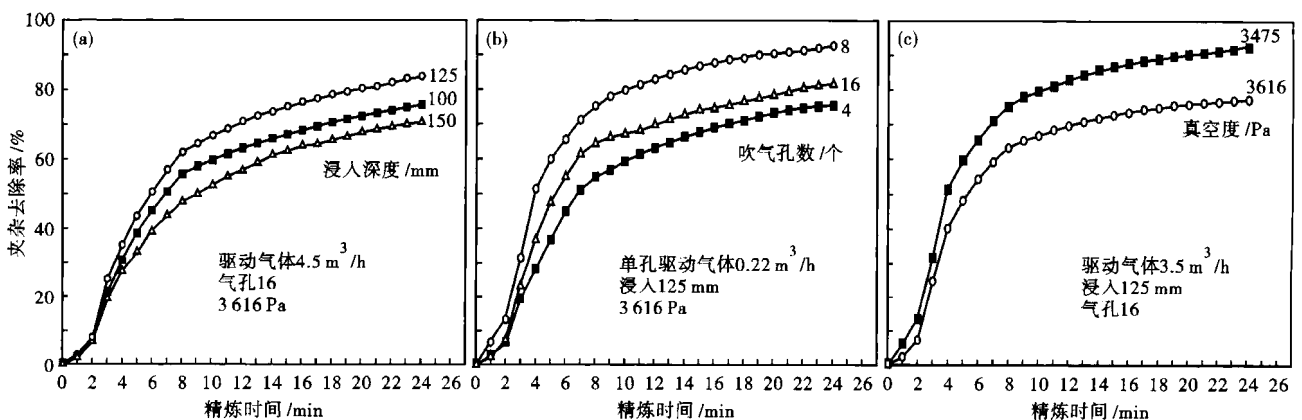


图 4 不同浸入深度(a)、气孔数(b)和真空度(c)时总夹杂去除率与精炼时间的关系

Fig. 4 Relation between total inclusion removal rate and refining time with different immersion depth (a), different number of stomata (b) and different vacuum (c)

由图4(c)可知,适当降低真空度,夹杂去除率明显提高。真空度的变化直接影响真空室内的液位高度及钢液循环流量,循环流量随着真空度的增大而增大,循环流量过大时,会使熔池表面不稳定,夹杂来不及去除就被再次卷入钢液。合适的真空度,使钢液的扰动情况得以控制,夹杂去除的效率明显提高。

2.2 卷渣的影响因素

(1)处理量210 t、浸入深度150 mm、驱动气体流量 $4.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 、真空度3 616 Pa、孔数16,不提供底吹气体。渣的卷入量为514 mL,占实验总渣量的2%。

(2)处理量不变、浸入深度150 mm、驱动气体流量 $4.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 、真空度3 616 Pa、孔数16,采用单、双底部透气砖在上升腿或上升、下降腿正下方位置处吹入气体。得到的实验数据如表3。

表3 底部单、双吹卷渣量和较无底吹卷渣减少量

Table 3 Amount of slag entrapment with single and double bottom blowing and decreasing amount of slag entrapment as comparing with no-bottom blowing

底吹 气体流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	单透气砖吹气		双透气砖吹气	
	卷入渣量/ mL	较无底吹 减少量/%	卷入渣量/ mL	较无底吹 减少量/%
0.40	493	4.1	366	28.8
0.75	384	25.3	249	45.7
1.25	270	47.5	206	60.0
1.50	407	20.8	236	54.1

在通过底部透气砖供气,真空室上升、下降管在经底吹形成的渣眼处插入的情况下,单、双透气砖底吹时均有明显的驱渣效果。随着吹气量的增大渣的卷入量均为先减小后增大,即有一个最佳值。由表3可知,底吹气体流量为 $1.25 \text{ m}^3/\text{h}$ 时的渣卷入量最小,单吹时卷入量为270 mL;双吹时卷入量为206 mL。双吹驱渣效果明显好于单吹,经计算双吹时的卷渣量为总渣量的0.8%,较无底吹可减少直接卷渣量60%。

在实验过程中,无底吹的情况下,当插入管下降到指定浸入深度时,可以明显的看到有相同厚度的渣进入上升腿和下降腿中,随着循环的进行,渣进入熔池形成夹杂;底部透气砖吹气的情况下,上升腿或下降腿正下方的熔池被吹出渣眼,形成了一个无渣区域,随着气体流量的增大,无渣区域面积有所增大。

单透气砖吹气的情况下,打开底吹后,上升腿的

正下方的熔池被吹出渣眼,形成一个无渣区,随着气体流量的增大,无渣区域面积有所增大,当插入管下降到指定浸入深度时,有一定厚度的渣进入下降腿,最终进入熔池形成夹杂物,上升腿中的渣明显减少。

双透气砖吹气的情况下,随着气体流量的增大,上升腿和下降腿正下方的无渣区域面积越来越大,真空室下降到指定浸入深度时,液面上几乎看不到渣进入上升腿和下降腿。

无论是单透气砖吹气还是双透气砖吹气,气体流量过大时,液面翻滚剧烈并且有较严重的喷溅现象,因为液面剧烈的波动而使更多的渣卷入钢液中,因此气体流量过大时,卷渣现象并没有得到明显改善,合理的底吹气量有利于减少卷渣现象。

现场生产时,真空室下降过程中,短时间进行底部透气砖吹氩气,可以较明显地减少钢液循环中的夹杂量。

3 结论

(1)RH去夹杂时,前8 min夹杂的去除最快,处理24 min后可将模拟夹杂去除约90%;合理的驱动气体流量为 $4.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 、气孔数为8个、浸入深度为125 mm,适当降低真空度有利于夹杂的去除,合理的真空度为3 475 Pa;转化为现场数据:驱动气体流量 $164.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 、气孔数为8个、浸入深度为500 mm、真空室内绝对压力为4 000 Pa。

(2)真空室下降时双透气砖短时间底吹氩气可明显减少钢液卷渣量,合理的双吹总气体流量为 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$,卷渣量为总渣量的0.8%,较无底吹可减少直接卷渣量60%。转化为现场数据:双透气砖底吹总吹氩量 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

参考文献

- 1 郑淑国,朱苗勇,潘时松. RH真空精炼装置内夹杂物行为的实验研究. 金属学报,2006,42(6):657
- 2 耿佃桥,雷洪,赫冀成. RH装置内夹杂物聚合与去除的三维数值模拟. 钢铁研究学报,2009,21(12):10
- 3 吴华杰,包燕平,岳峰,等. RH真空处理GCr15轴承钢中全氧及显微夹杂物的行为研究. 北京科技大学学报,2009,31:121
- 4 艾新港,包燕平,吴华杰. RH工艺生产轴承钢脱氧和去除夹杂物研究. 钢铁,2009,44(7):43
- 5 Miki Y, Shimada Y, Thomas B G, et al. Model of Inclusion Removal during RH Degassing of Steel. Iron Steelmaker,1997,24(8):31

迟云广(1986-),男,硕士研究生,冶金过程数学物理模拟和计算机控制。

收稿日期:2011-03-15