

# 厚渣层熔融还原铁浴混合特性的物理模拟

李承志, 何奕波, 李 强, 邹宗树  
(东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 设计了应用于厚渣层冶炼的铁浴熔融还原炉模型, 通过水模实验研究了反应器在不同底吹布置下多层侧枪操作参数对熔池混匀时间的影响规律. 单孔底吹实验结果表明, 与纯侧吹实验相比, 中枪角度、深度以及下枪角度的影响变弱, 下枪插入深度的影响增强. 多孔底吹实验结果表明: 双孔底吹的混匀时间总体上小于四孔底吹布置; 当喷嘴数目相同时, 非对称底吹的混匀时间小于对称底吹布置. 通过比较6种底吹布置下最优参数组合所对应的混匀时间, 确定反应器最佳底吹参考布置为双孔非对称底吹, 相应的侧枪参数为中枪角度 $50^{\circ}$ 、中枪水平深度180 mm、下枪角度 $50^{\circ}$ 、下枪水平深度180 mm.

**关 键 词:** 熔融还原; 铁浴反应器; 厚渣层; 物理模拟; 混匀时间

中图分类号: TF 557 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2014)09-1266-05

## Physical Simulation of Fluid Mixing in a Smelting Reduction Iron-Bath with Thick Slag Layer

LI Cheng-zhi, HE Yi-bo, LI Qiang, ZOU Zong-shu

(School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LI Cheng-zhi, E-mail: jacky\_9730@126.com)

**Abstract:** An iron-bath reactor with thick slag layer for smelting reduction was designed, and the influences of blowing parameters on bath mixing time were studied with a water model. The results showed that using single-nozzle bottom blowing, the influences of middle lance inclination angle and immersion depth and lower lance inclination angle are smaller and the influence of lower lance immersion depth is greater, compared with side blowing only. The mixing time with two-nozzle bottom blowing is shorter than that with four-nozzle bottom blowing. With the same number of bottom nozzles, the mixing time with asymmetric nozzle layout is shorter than that with symmetric layout. Comparing the mixing time of the six optimum blowing combinations, the asymmetrical two-nozzle bottom blowing is the best combination for the reactor, and the corresponding optimum side blowing is as follows:  $50^{\circ}$  inclination angle, 180 mm immersion depth of middle lance and  $50^{\circ}$  inclination angle, 180 mm immersion depth of lower lance.

**Key words:** smelting reduction; iron-bath reactor; thick slag layer; physical simulation; mixing time

作为钢铁工业的前沿技术之一, 熔融还原炼铁法以其独特的工艺优势愈加受到国际钢铁界的重视<sup>[1-2]</sup>. 近十年来多种新型熔融还原工艺层出不穷<sup>[3-4]</sup>, 为现代冶金工艺带来源源不断的动力. 但是目前该工艺仍然存在很多技术问题, 例如如何保证在提高二次燃烧率的同时实现反应器内氧化气氛与还原区域的分离<sup>[5]</sup>. 在一定条件下, 熔

池中较厚的渣层能够有效地隔离反应器内的氧化区与还原区, 防止铁滴二次氧化. 当炉料为块矿或球团矿时, 增加渣层厚度还可以保证矿料与熔渣有充足的接触面积和接触时间, 加速矿料的熔化. 在该过程中, 熔渣流体的运动状态对矿石还原速率和矿石分布状态都有直接的影响, 因此研究熔渣流体的混合特性对厚渣层熔融还原工艺的设计

开发至关重要。

本文以厚渣熔融还原流程为背景,设计制作铁浴反应器模型,通过物理模拟实验研究反应器内流体的混合特性,总结在不同底吹布置下多层侧枪操作参数对流体的搅拌规律,为优化厚渣层熔融还原工艺提供理论依据. Katayama 等<sup>[6]</sup>研究了厚渣熔融还原过程中铁氧化物的还原机理和熔池传热机制,发现熔池中充足的碳颗粒能够保证该工艺具有很高的生产效率. 物理模拟方面, Chou 等<sup>[7]</sup>研究了在固定渣层厚度下,底吹喷嘴数目等参数对熔融还原过程中渣铁传质的影响;王周勇等<sup>[8]</sup>研究了在不同渣铁比条件下顶枪流量、枪位和底吹流量对熔池混匀时间的影响。

1 铁浴反应器原型和模型的设计

铁浴反应器炉体的高径比参照转炉的高径比设计<sup>[9]</sup>,铁水产量的设定目标值为 30 万吨/年. 根据熔融还原过程的物料衡算结果,可得到反应器的主要参数如表 1 所示. 考虑到厚渣层对铁浴炉“上热下传”的阻碍,将反应器的喷吹系统设计为多层侧吹与底吹相结合的复吹模式,如图 1 所示。

表 1 铁浴反应器的主要参数

Table 1 Main parameters of iron-bath reactor

尺寸参数		物料参数	
炉缸内径	6.0 m	铁水高度	1.35 m
炉身内径	9.0 m	渣层厚度	5.25 m
炉缸高度	2.0 m	煤粉总质量	25.90 t/h
炉体高度	13.5 m	氧气总体积	26.92 km <sup>3</sup> /h

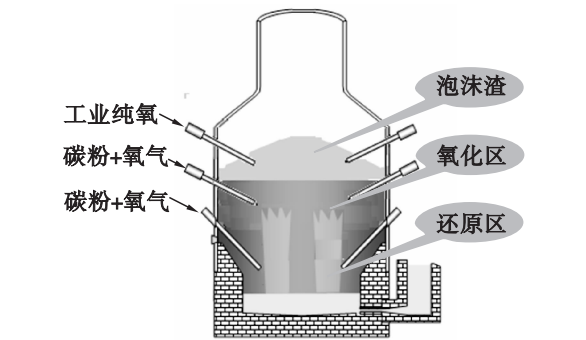


图 1 铁浴反应器侧吹布置示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of side-blowing of iron-bath furnace

上层侧枪于熔池上方喷吹氧气,目的是熔化加入的矿石;中层枪于渣层中部喷入煤粉和氧气( $n_c:n_o=1:1.2$ ),旨在强化气体对熔池内部的搅拌并向熔池提供还原所需的热量,另外碳颗粒能

抑制泡沫渣的大量形成,保证渣层的稳定性;下枪于渣层下部喷吹煤粉和氧气( $n_c:n_o=1.7:1$ ),目的是为还原区域提供还原剂并补充还原所需的部分热量,防止下部温度过低. 根据上述设计内容建立铁浴反应器水模型(1:15),其主要尺寸及实验配置如图 2 所示。

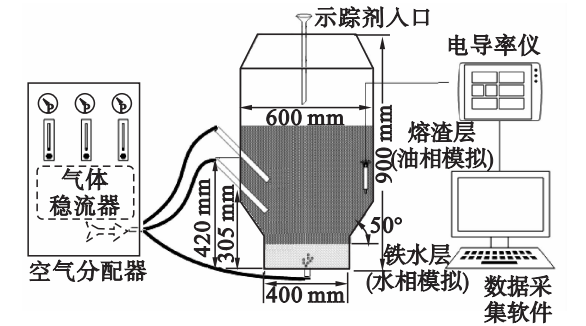


图 2 水模型实验装置示意图  
Fig. 2 Schematics of water-model experimental apparatus

2 实验参数的确定

实验利用“刺激 - 响应”方法来测定熔池的均混时间,从而研究熔池的混合特性. 由于上枪射流对熔池流体的作用很小,因此在实验中忽略上层喷枪对熔池混匀时间的影响,只针对中、下两层喷枪及底吹系统进行研究. 实验中共设计 5 种底吹布置,如图 3 所示。

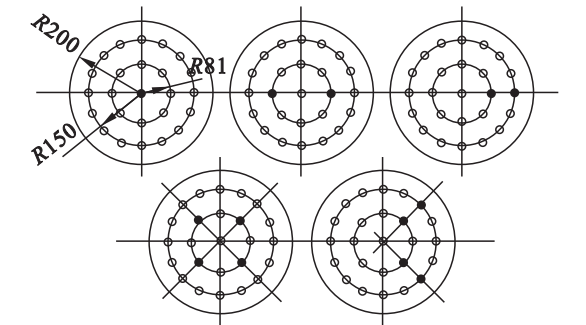


图 3 模拟实验中底吹分布设计图  
Fig. 3 Design of bottom-blown layout in the experiment

2.1 实验材料的确定

为了真实地模拟渣、铁的流动特性,一般将运动黏度作为选择流体的主要标准,同时也要考虑密度、相溶性等物理性质. 但是在准备过程中发现符合熔渣模拟标准的液体均属于有机相,示踪剂无法在其中溶解并电离,因此电导率仪无法测得有效的数据. 其他几种测定方法(pH 值法、染色法等)也没有获得较好效果,故用单一水相来代替之前设定的水、油两相. 研究单相流体的混匀时间可以整体地考察出在同一反应器内喷吹布置及

参数对流体混合效果的影响规律,为铁浴熔融还原喷吹系统的设计提供一定的参考.

2.2 实验操作参数的确定

本研究主要考察气体搅拌对熔池混合的影响,因此实验中所选择的决定性相似准数为表示气流惯性力和浮力与液体重力之比的修正弗鲁德准数  $Fr'$ :

$$Fr' = \frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \cdot \frac{v_g^2}{gd} \approx \frac{\rho_g}{\rho_l} \cdot \frac{v_g^2}{gd} \tag{1}$$

式中: $\rho_l, \rho_g$  为液体和气体的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $v_g$  为气体速度,  $\text{m/s}$ ;  $d$  为体系的特征尺寸,  $\text{m}$ .

令  $Fr'(\text{铁浴炉原型}) = Fr'(\text{物理模型})$ , 根据式(1)可得到两系统气体流速的比值:

$$\frac{v_m}{v_f} = \sqrt{\frac{\rho_{O_2} \cdot \rho_w \cdot d_m}{\rho_{air} \cdot \rho_s \cdot d_f}} = \sqrt{\left(\frac{PM}{T_{O_2}}\right) / \left(\frac{PM}{T_{air}}\right)} \cdot \sqrt{\frac{\rho_w \cdot d_m}{\rho_s \cdot d_f}} \tag{2}$$

在式(2)的基础上,根据几何相似比  $\lambda$  便可确定两系统喷吹气体的流量比.

在参考其他熔融还原反应器的基础上,侧枪水平插入深度和侧枪角度的变量设计值如下:侧枪与水平夹角分别为  $30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ ; 水平插入深度为 60, 120, 180 mm (0.2  $r$ , 0.4  $r$ , 0.6  $r$ ).

实验设计方案采用正交试验法,并根据  $L_9(3^4)$  正交表进行分组实验(如表 2 所示). 每组实验在相同条件下独立重复做 3 次,各组间实验除侧枪操作参数发生变化外,其他实验条件及实验方法均保持相同. 实验后通过极差分析和方差分析来研究各操作参数对混匀时间的影响程度,并优化出最佳的参数组合.

表 2 正交试验的因素水平表				
Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment				
水平	A 中枪 角度/(°)	B 中枪 深度/mm	C 下枪 角度/(°)	D 下枪 深度/mm
1	30	60	30	60
2	40	120	40	120
3	50	180	50	180

3 实验结果与讨论

3.1 单纯侧吹实验结果分析

作为对照实验,纯侧吹实验考察了在无底吹条件下,侧枪参数的变化对熔池搅拌的影响趋势及各因素对混匀时间影响的主次关系. 由图 4 可知,4 个因素对混匀时间的影响程度均比较显著,极差大小关系为: $R_A(9.67) > R_C(5.89) > R_D(5.44) > R_B(4.33)$ . 通过极差分析和方差分析

得到纯侧吹条件下的最佳参数组合为  $A_3B_3C_3D_2$ .

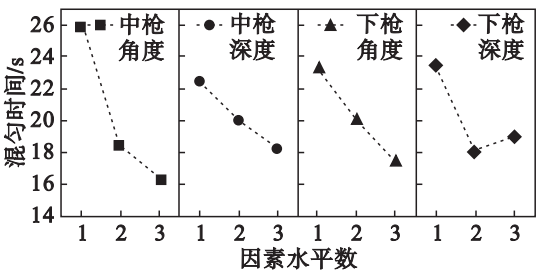


图 4 纯侧吹条件下的混匀时间  
Fig. 4 Mixing time of bath with side-blowing only

3.2 单孔底吹布置实验结果分析

图 5 是增加单孔底吹后熔池的混匀时间. 与纯侧吹相比,各因素对混匀时间的影响程度和趋势均有所变化. 首先,混匀时间随着中枪角度的增加出现先增大后减小的趋势,随着下枪插入深度的增加不断减小,中枪插入深度、下枪角度在水平 2 处达到混匀时间极小值. 另外中枪角度和插入深度的极差值与纯侧吹相比显著减小,极差大小顺序为: $R_D(9.44) > R_C(4.33) > R_A(2.78) > R_B(2.00)$ .

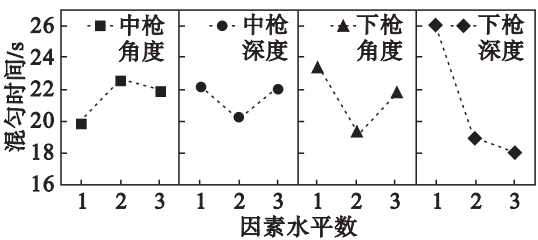


图 5 单孔底吹条件下的混匀时间  
Fig. 5 Mixing time with single-nozzle bottom blowing

3.3 双孔对称/非对称底吹布置实验结果分析

图 6 是在双孔对称和非对称底吹条件下熔池的混匀时间. 在对称底吹布置下,除中枪角度外,其余因素的极差值都相对较小. 中枪角度、中枪插入深度在水平 2 处达到混匀时间的极值;随着下枪插入深度的增加,混匀时间不断下降. 与对称底吹相比,非对称底吹的混匀时间在整体上明显缩短. 除中枪角度和下枪插入深度以外,其他

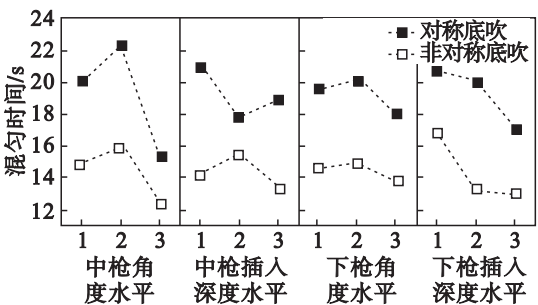


图 6 双孔对称/非对称底吹的混匀时间  
Fig. 6 Mixing time with symmetrical/asymmetrical bottom blowing with two nozzles

因素水平数的变化对混匀时间的影响并不明显.

3.4 四孔对称/非对称底吹布置实验结果分析

图 7 为四孔对称和非对称底吹布置下熔池的均混时间. 在对称底吹条件下, 中枪角度和下枪插入深度对混匀时间的影响比较明显. 混匀时间随着中枪角度的增加出现先增大后减小的趋势, 随着下枪深度的增加不断下降. 在非对称底吹条件下, 中枪角度和下枪插入深度的极差值依然较大, 其余因素的极差值变小. 各因素对混匀时间的影响趋势也与前者基本相同.

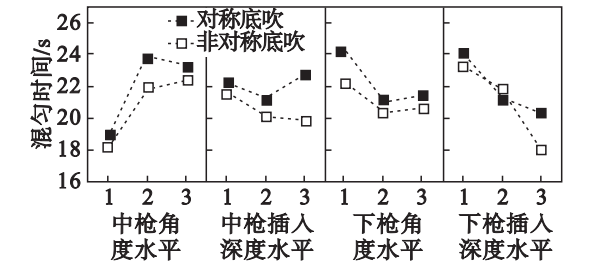


图 7 四孔对称/非对称底吹的混匀时间  
Fig. 7 Mixing time of symmetrical/asymmetrical bottom blowing with four nozzles

3.5 多种底吹布置条件的比较

1) 单孔底吹与纯侧吹的比较. 与纯侧吹相比, 单孔底吹条件下中枪角度、插入深度和下枪角度的极差值显著降低, 下枪插入深度的极差值增大. 其原因主要考虑为: 加入单孔底吹后, 底吹气流加强了对熔池垂直方向上的搅拌并促进了熔池中心区域流体的流动, 削弱了侧枪角度和中枪插入深度的影响; 单孔底吹的加入使下枪的喷吹流量减小(底吹流量为下层侧枪的分流量), 因此下枪插入深度会显著地影响气流在熔池内的作用范围, 进而影响搅拌效果.

2) 多孔底吹布置的比较. 图 8 分别展示了在对称和非对称底吹条件下, 双孔布置与四孔布置的混匀时间. 由图可知, 两种情况下双孔底吹布置的混匀时间值总体上均小于四孔底吹布置. 上述现象可解释为在四孔底吹条件下, 气体流量进一步分散, 流体被分割成更多独立分散的小区域, 各气液上升流独立搅拌周围的液体, 各子区域不能充分混合, 导致区域间的质量交换速率很小, 因此不利于熔池内流体的混匀.

当底吹喷嘴数目相同时, 非对称底吹布置下的混匀时间值总体上小于对称底吹布置, 如图 9 所示. 在非对称条件下, 底吹气体对流体产生了水平方向上的搅拌作用, 从而推动熔池在整体上形成循环运动, 缩短了混匀时间.

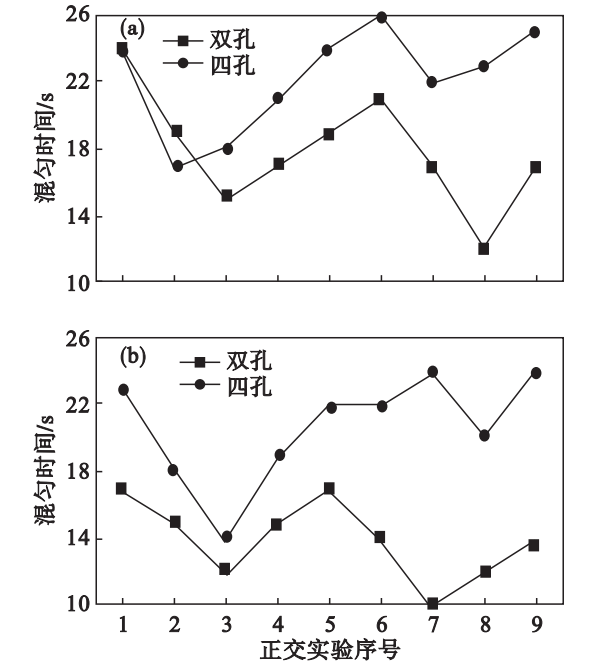


图 8 双孔底吹与四孔底吹混匀时间的对比  
Fig. 8 Comparison of mixing time between bottom blowing with two nozzles and four nozzles  
(a) — 对称底吹条件; (b) — 非对称底吹条件.

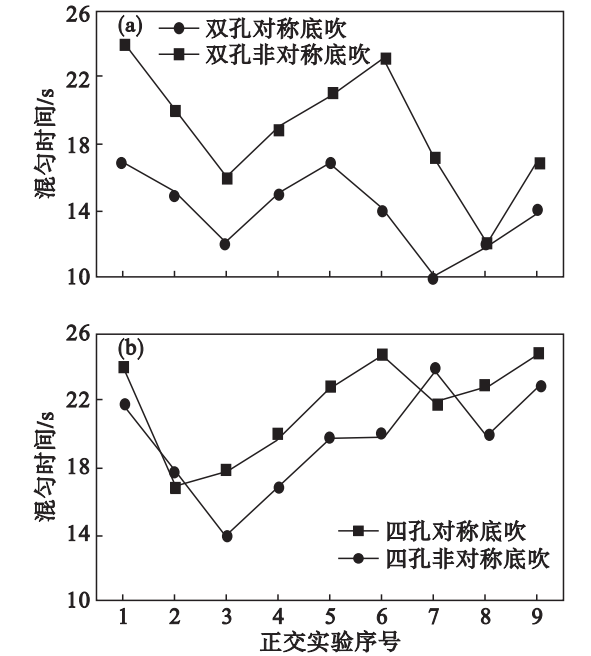


图 9 对称底吹与非对称底吹混匀时间的对比  
Fig. 9 Comparison of mixing time between symmetrical and asymmetrical bottom blowing  
(a) — 双孔底吹条件; (b) — 四孔底吹条件.

表 3 列出了各最优喷吹组合下的熔池混匀时间测定值. 从表 3 结果可知双孔非对称布置条件下的最优参数组合最为理想, 混匀时间最短, 可以将其作为喷吹布置设计的参考.