

## 100 kg 中频感应炉底吹氧搅拌的水模拟研究

齐洪杰 赵增武 金永丽 李保卫

(内蒙古科技大学, 内蒙古自治区白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室;  
省部共建国家重点实验室培养基地, 包头 014010)

**摘要** 采用几何相似比1:1的水模型对100 kg中频感应炉底吹氧的工艺参数(底吹流量0.2~0.56 m<sup>3</sup>/h, 熔池高度120~330 mm)和流场进行模拟试验。结果表明,底吹熔池内形成的气相流速在竖直方向上变化不明显,而在水平方向上存在较大梯度;随熔池高度和底吹流量的增加,气相流速梯度变大,竖直气-液两相流变为倾斜向上运动;在熔池高度 $H$ 小于240 mm、气体流量 $Q$ 小于0.56 m<sup>3</sup>/h时,混匀时间分别随熔池高度和底吹流量的增加而减小,超过这一范围后混匀时间变化不明显。

**关键词** 100 kg 中频感应炉 底吹搅拌 物理模拟 混匀时间 流场

## A Study on Water Modelling for Bottom Blowing Oxygen Stirring of a 100 kg Medium Frequency Induction Furnace

Qi Hongjie, Zhao Zengwu, Jin Yongli and Li Baowei

(Inner Mongolia Key Laboratory for Utilization of Baiyun Obo Multi-Metallic Resources; Elected State Key Laboratory, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

**Abstract** The simulation test on bottom blowing oxygen parameters (bottom blowing rate 0.2 ~ 0.56 m<sup>3</sup>/h, bath height 120 ~ 330 mm) and flow field of liquid in a 100 kg medium frequency induction furnace is carried out by a geometric similarity ratio 1:1 water model. The results show that the change of velocity of gas phase flow formed in bottom blowing bath in vertical direction is not obvious, but there is large velocity gradient in horizontal direction; with increasing bath height and bottom blowing rate the gas phase velocity gradient increases and the vertical gas-liquid two phase flow upward movement is modified to out of the perpendicular; as bath height  $H$  less than 240 mm and gas flow rate  $Q$  less than 0.56 m<sup>3</sup>/h, with increasing bath height and bottom flow rate the mixing time decreases, and beyond these scope the variation of mixing time is not obvious.

**Material Index** 100 kg Medium Induction Furnace, Bottom Blowing Stirring, Physical Simulation, Mixing Time, Flow Field

感应炉的底吹工艺对感应炉的吹炼效果、生产能力及钢水质量有直接影响。由于实际生产中具体设备情况及结构参数的差异,以及生产条件和冶炼品种的不同,需要达到的冶炼效果也不同<sup>[1]</sup>。在白云鄂博矿铁钼稀土资源协同利用的研究中,选择性氧化是其中的关键技术,因此,把握熔池内流体的流动行为,有效调节熔池的搅拌混匀时间,满足不同吹炼阶段对冶金反应热力学和动力学条件的要求。

本实验利用水力模型,研究了100 kg底吹中频感应炉冶炼中气体流量、熔池高度等工艺参数对熔池流动行为的影响,优化相关参数,提高物料在熔池中的利用率,达到合适的搅拌强度以缩短混匀时间,降低终点钢水的碳含量的冶金效果。

### 1 实验原理

实验根据相似理论<sup>[2]</sup>,如果现象满足相似第二

定理,则由模型得到的规律可以推广到原型中去。对于底吹感应炉炼钢反应,假设忽略电磁搅拌力的作用,只考虑底吹气体带给熔池的能量,则只须保证几何相似和动力相似。实验中的相似比为1:1。

实验主要研究熔池内气-液两相的流体流动行为,引起体系内流动的动力主要是气泡浮力而不是湍流的粘性力,因此对于感应炉底吹冶炼而言,保证原型与模型的修正弗鲁德准数相等<sup>[3,4]</sup>,就能基本保证它们的动力相似,即:

$$(Fr')_m = (Fr')_p \quad (1)$$

式中: $(Fr')_m$ -修正的弗鲁德准数; $m, p$ -分别代表模型和原型。

$$\frac{\rho_{g,m} u_m^2}{\rho_{l,m} g H_m} = \frac{\rho_{g,p} u_p^2}{\rho_{l,p} g H_p} \quad (2)$$

$$u = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (3)$$

式中:  $\rho_{g,m}, \rho_{g,p}$ - 模型和原型底吹气体的密度;  $\rho_{l,m}, \rho_{l,p}$ - 模型和原型熔池中液体的密度;  $u_m, u_p$ - 模型和原型的特征速度;  $H_m, H_p$ - 模型和原型的熔池高度;  $g$ - 重力加速度;  $d$ - 喷嘴直径。

将式(3)代入式(2)中可得模型底吹气体流量与原型的关系:

$$Q_m = \left[ \frac{\rho_{g,p}}{\rho_{g,m}} \cdot \frac{\rho_{l,m}}{\rho_{l,p}} \left( \frac{d_m}{d_p} \right)^4 \left( \frac{H_m}{H_p} \right) \right]^{1/2} Q_p = 0.382 Q_p \quad (4)$$

原型和模型的各实验参数见表 1。

## 2 实验设备及方法

图 1 为实验流程图。采用内径 220 mm, 高 440 mm 的圆柱形有机玻璃容器模拟感应炉, 常温水模拟高温钢液, 氧气流量通过量程为 1.0 m<sup>3</sup>/h 的玻璃转子流量计进行控制。为避免光学形变, 在圆柱形容器周围套一方形容器, 实验时在两个容器的环缝间注满水。感应炉底吹元件为布置在炉底中心的弥散型透气砖。

实验采用 DJ800 型多功能检测系统, 利用刺激-响应技术<sup>[5-8]</sup> 测量熔池的混匀时间, 用熔池的混匀时间判断钢液的搅拌情况。当熔池内流动稳定后, 加入 20 mL 浓度为 12% 的 KCl 溶液, 同时采集数据, 获得熔池中电导率的变化, 当数字电导仪输出的电导率变化达到稳定的时间<sup>[7]</sup>, 即为熔池搅拌的混匀时间, 每组试验重复多次, 取平均值。

流场的结构和运动形式采用示踪显示和粒子图像测速仪 (Particle Image Velocmetry, 简称 PIV) 测量相结合的方法<sup>[8]</sup>。示踪显示实验使用水模拟钢液, 高锰酸钾做示踪粒子; 由于经透气砖喷入熔池的气体被迅速分割成许多弥散小气泡, 气泡本身条件良好, 可作为 PIV 测量所用的示踪粒子。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 底吹熔池的流动形态与混合机理

底吹感应炉内气液两相区结构、能量传输及形成循环流的特点对熔池冶炼起决定性作用。图 2 是在  $H = 120 \text{ mm}, Q = 0.56 \text{ m}^3/\text{h}$  的工况下, 摄影记录

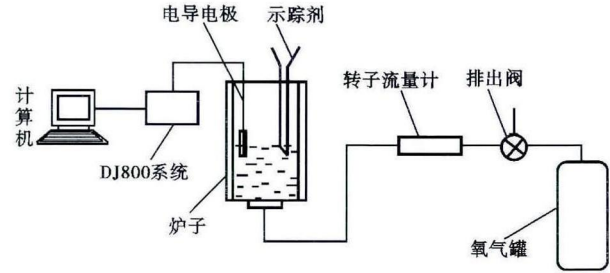


图 1 物理模拟装置图

Fig. 1 Schematics of device for physical simulation

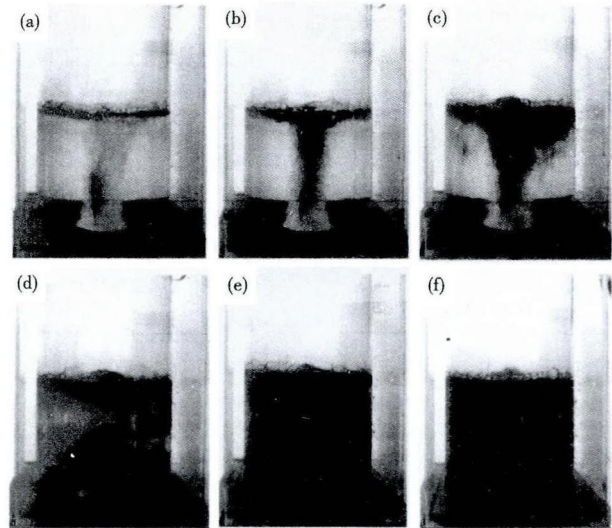


图 2 弥散型透气砖熔池内流体的流动结构 ( $H = 120 \text{ mm}, Q = 0.56 \text{ m}^3/\text{h}$ ), 时间/s: (a)1; (b)1.5; (c)2; (d)3; (e)3.5; (f)4

Fig. 2 Flow structure of liquid in bath with dispersive gas permeable brick for 1 (a), 1.5 (b), 2 (c), 3 (d), 3.5 (e) and 4 (f) second,  $H = 120 \text{ mm}, Q = 0.56 \text{ m}^3/\text{h}$

熔池内熔体的动态流动结构显示图。可以看到熔池内的液体在氧气的作用下, 在透气砖上方迅速形成由大量弥散型气泡组成的气液两相流, 气泡直径为 2~3 mm。周围液体在上浮气泡群抽引的作用下从炉底开始不断被吸卷进入流股, 两相流不断上升到熔池表面, 气液相分离, 分离出来的液相流体受到惯性力的作用, 在液面形成一个圆凸区, 不断上涌的钢水和圆凸区高度造成的势压头, 迫使被抽引的流体在熔池表面流向四周, 形成一层水平流, 碰到熔池侧壁沿侧壁向下运动, 到距炉底 1/3 处时又被气泡群抽引流向气液两相区, 形成主循环区的流动, 这部分区域内流体的流动可以大大加速流体内部的传热传质行为。在主循环区的内部形成旋涡区, 其内的大部分流体作局部循环流动, 不断搅拌混匀熔池, 直到熔池内的流动稳定。

表 1 原型和模型的主要参数

Table 1 Main parameter of prototype and model

项目	熔池直径/mm	炉高/mm	熔池高度/mm	液体密度/种类 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	底吹气体	底吹流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$
原型	220	440	188~226	钢液 6 830	氧气	0.5~1.5
模型	220	440	188~226	水 1 000	氧气	0.191~0.573

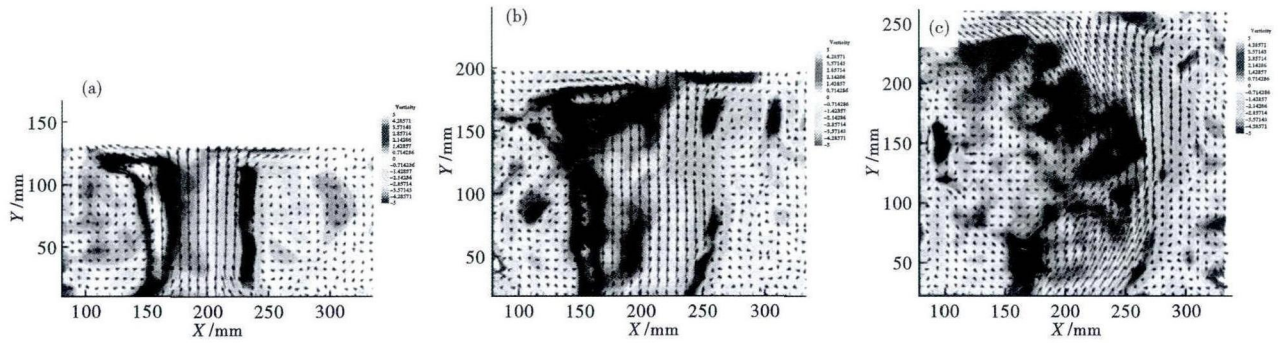


图 3 熔池高度  $H$  对气流速度分布的影响,  $Q=0.56 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H/\text{mm}$ : (a) 120; (b) 180; (c) 240

Fig. 3 Effect of bath height  $H$  on distribution of gas flow velocity,  $Q=0.56 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H/\text{mm}$ : (a) 120; (b) 180; (c) 240

### 3.2 熔池高度对流场及混合的影响

由图 3 示出的 PIV 测量熔池内的流体的速度分布可以看到,从弥散型透气砖喷入熔池的气体在出口处具有一定的动能,这些动能用于气体克服熔池底部的静压力向上运动。在透气砖上方形成气液两相流区,气相流在竖直方向上的速度变化不明显,而在水平方向上却存在较大的速度梯度,从左向右速度逐渐减小。

底吹流量不变,在较低的熔池高度下熔池内形成竖直向上的气液两相流,随着熔池高度的增加两相流发生倾斜。通过对测量的气相速度场分析可知,由于两相区内气泡的速度场左右大小不平衡,存在速度梯度,随着熔池高度的增加,气相流中左部速度较大的范围不断扩大,进一步拉大了气相内部的速度梯度,故最后导致流注倾斜,使得两相流周围的流场变得不对称,在熔池的一侧形成范围较大的液相区,其内形成的循环流可基本上占据整个熔池,循环流长度很大。

图 4 是流量分别为  $0.20, 0.32, 0.56 \text{ m}^3/\text{h}$  时测量的不同熔池高度下的混匀时间。当熔池高度小于  $240 \text{ mm}$  时,混匀时间随熔池高度的增加而减小,因为熔池中的液体循环流长度随着熔池高度的增加而增加,导致熔池中较大的液体速度;另一方面,通过分析流场的速度分布可知,底吹流量不变 ( $Q=0.56 \text{ m}^3/\text{h}$ ),增加熔池高度,气相流中左部速度较大的范围不断扩大,因此,气体能带给熔池更高的搅拌能量,可加速熔池的混匀。当熔池高度增加到  $240 \text{ mm}$  之后,混匀时间随高度的变化趋于平缓。因此,最佳的熔池高度为  $220 \sim 260 \text{ mm}$ 。

### 3.3 底吹流量对熔池流场和搅混的作用

图 5 是增加底部吹气流量熔池内流场的变化,可以看到气体流量增大,气相速度整体变大,气相流在竖直方向上也开始有速度梯度存在。

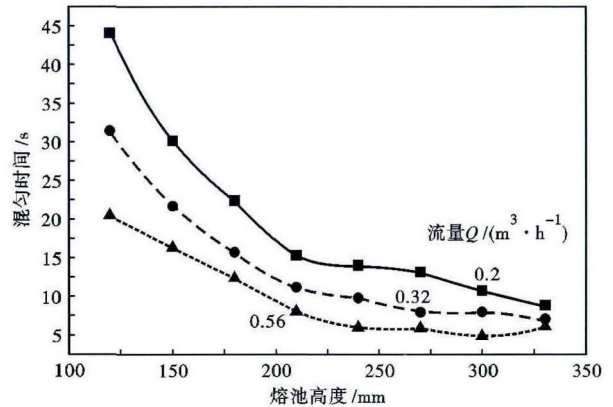


图 4 混匀时间随熔池高度的变化

Fig. 4 Variation of mixing time with bath height

从底部吹入熔池的气体将所携带的能量用于对熔池搅拌、形成气泡、熔池的喷溅和晃动等。如图 6 选择 3 个熔池高度:  $120, 150, 210 \text{ mm}$ , 分别测量不同底吹流量下的混匀时间。从测量的结果可以看到,当气体流量很小时,混匀时间相当长,这时气泡对熔池所作的功大多用于促进熔池内部液体的流动,形成环流,吹入熔池的气体不足以搅拌熔池;随着底吹流量的增加,气体带给熔池的能量密度和小气泡数量也相应增加,从而形成高速环流,使熔池的混匀时间明显降低,环流周期缩短;底吹气流量继续增加到  $0.56 \text{ m}^3/\text{h}$ ,混匀时间减小十分缓慢,图 6 中能够看出在熔池高度为  $120 \text{ mm}$  时,混匀时间甚至出现了增大的趋势。

当气体携带的能量超过形成气泡和搅拌熔池所需的能量时 剩余的能量只能用于形成熔池喷溅和气-液界面间的能量交换,严重时会出现气流吹透熔池的现象。若继续增加底吹流量,气体带给熔池的总能量增大,但早已超出形成液体环流和气泡所需的能量,造成多余能量的浪费。另外,底吹流速过大

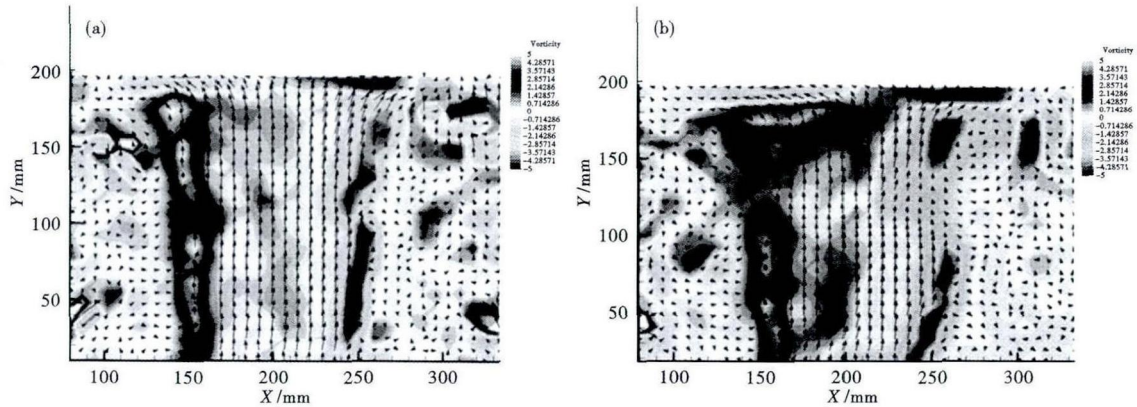


图 5 供气强度  $Q$  对熔池气流速度分布的影响,熔池高度  $H = 180$  mm,  $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$  - (a) 0.15; (b) 0.56

Fig. 5 Effect of intensity of supply gas  $Q$  on distribution of gas velocity in bath, bath height  $H = 180$  mm,  $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$  - (a) 0.15; (b) 0.56

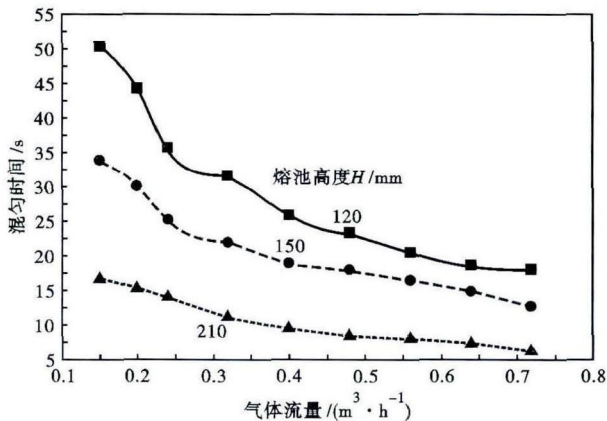


图 6 气体流量(供气强度)对混匀时间的影响

Fig. 6 Effect of gas flow rate (intensity of gas supply) on mixing time

时,气体还未能与熔池内各元素发生充分反应便迅速穿透熔池,气泡在熔池内的停留时间太短,搅拌能量不能被充分利用。因此,在实验条件下,合适的底吹供气量为  $0.48 \sim 0.56 m^3/h$ ,最大流量不应超过  $0.56 m^3/h$ 。

#### 4 结论

(1)通过对熔池内流动状态的分析可知感应炉内熔池的流动特征,弥散型透气砖喷入熔池的气体,在透气砖上方形成大量弥散小气泡,气体抽引周围流体向上运动,当到达熔池液面时,气体溢出,流体在表面形成水平流,碰到器壁后向下运动到炉底的流体又被气泡群抽引,这样不断循环流动搅拌熔池。

(2)气相流在竖直方向上速度变化不明显,而在水平方向上存在较大的速度梯度。随着熔池高度的增加,气相流中左部速度较大的范围不断扩大,气泡的平均速度增加,当达到一定高度时,两相流倾

斜。底吹流量的增加可使气相流在竖直方向上也产生速度梯度。

(3)底吹氧搅拌时熔池高度在  $220 \sim 260$  mm、供气流量在  $0.48 \sim 0.56 m^3/h$  比较合理,可获得良好的搅拌效果。

教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0911),内蒙古自然科学基金(2011MS0726)和内蒙古科技大学创新基金(2012NCG007)资助。

#### 参考文献

- [1] 戴云阁,李文秀,龙腾春. 现代转炉炼钢[M]. 沈阳:东北大学出版社,1999:91.
- [2] 朱苗勇,萧泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟[M]. 北京:冶金工业出版社,1998:123-184.
- [3] 陈敏,廖广府,李光强,等. 210 t 顶底复吹转炉水模型实验研究[J]. 过程工程学报,2011,11(1):36-39.
- [4] 王宏斌,唐海燕,李京社,等. 八流连铸中间包控流装置优化的水力学模拟[J]. 特殊钢,2012,33(3):18-21.
- [5] Murthy G G K, Mehrotra S P, Ghosh A. Experimental Investigation of Mixing Phenomena in a Gas Stirred Liquid Bath[J]. Metall Trans 1988, 19B:839-850.
- [6] Yamashita Shintaro, Miyamoto Ken-ichiro, Iguchi Manabu, et al. Model Experiments on the Mixing Time in a Bottom Blown Bath Covered with Top Slag[J]. ISIJ International, 2003, 43(11):1858-1860.
- [7] Choudhary K Shiv, Ajmani K Satish. Evaluation of Bottom Stirring System in BOF Steelmaking Vessel Using Cold Model Study and Thermodynamic Analysis[J]. ISIJ International, 2006, 46(8):1171-1176.
- [8] 陈伟庆. 冶金工程实验技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2004:130-134.

齐洪杰(1988-),女,硕士(内蒙古科技大学),2011年河北理工大学毕业,冶炼工艺物理模拟研究。

收稿日期:2013-06-24