

## 180 t 转炉底吹和顶-底复吹射流与熔池作用的水模型研究

包丽明<sup>1</sup> 吕国成<sup>1</sup> 刘坤<sup>2</sup>

(1 吉林电子信息职业技术学院冶金学院, 吉林 132021; 2 辽宁科技大学材料和冶金学院, 鞍山 114044)

**摘要** 根据180 t转炉的实际生产情况,以修正的Froude准数为相似准数,建立几何相似比10:1水模型,进行了四孔对称单纯底吹试验,并在最佳的底吹工艺参数下(底吹最佳位置为喷嘴所在同心圆直径:转炉熔池直径=0.3处;最佳流量为0.7 m<sup>3</sup>/h,均混时间18.2 s),通过改变顶吹氧枪的气体流量和吹炼枪位进行了顶底复吹转炉射流与熔池作用的试验。结果表明,在底吹条件下,增加顶吹工艺(最佳枪位150 mm,最佳流量39 m<sup>3</sup>/h),熔池平均的均混时间减少了5.6 s,180 t转炉顶底复吹可显著提高经济效益。

**关键词** 180 t 转炉 顶底复吹 均混时间 气体流量 氧枪枪位 底吹位置 水模型

## Water Modeling Study on Interaction of Jet and 180 t Converter Bath with Bottom Blowing as well as Top and Bottom Combined Blowing

Bao Liming<sup>1</sup>, Lü Guocheng<sup>1</sup> and Liu Kun<sup>2</sup>

(1 Metallurgical Institute, Jilin Technology College of Electronic Information, Jilin 132021;  
2 School of Materials and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114044)

**Abstract** According to the actual production situation of an 180 t converter, based on revised Froude number as experiment similarity number, a water model with geometrical-similar ratio 10:1 is established, the four holes symmetric bottom blowing test has been carried out, and with optimum bottom blowing process parameters (the bottom blowing optimum location is nozzle at the concentric circles which diameter / converter bath diameter = 0.3, and the optimum flow rate is 0.7 m<sup>3</sup>/h with mixing time 18.2 s), and the test of top and bottom combined blowing jet-bath interaction has also been carried out by modifying gas rate and lance level of top blowing oxygen lance. Results show that in bottom blowing condition, with increasing top blowing process (optimum lance level 150 mm, optimum gas flow rate 39 m<sup>3</sup>/h) the bath average mixing time decreases by 5.6 s, the economic benefits of 180 t converter top and bottom combined blowing steelmaking process increases obviously.

**Material Index** 180 t Converter, Top and Bottom combined Blowing, Mixing Time, Gas Flow Rate, Oxygen Lance Level, Bottom Blowing Location, Water Model

在氧气转炉炼钢过程中,炉内的形态是由力学、物理化学作用形成的,是一个复杂的运动过程。氧气射流经过高温炉气冲击熔池表面或穿入熔池,引起了熔池运动,起机械搅拌作用<sup>[1-2]</sup>。若搅拌作用强而且均匀,则冶炼过程化学反应快、冶炼平稳、效率高,有利于各项生产技术经济指标的提高。而氧气射流所产生的机械搅拌作用的强弱、均匀程度则取决于射流与熔池的相互作用情况。因此,研究射流与熔池的相互作用,对于了解氧气转炉的工作原理和指导实际冶炼有重要的意义。

均匀混合时间<sup>[3-4]</sup>是吹气设备用来表示其熔池内混合特性的一个重要参数,实验时用电导电极法测量熔池的混匀时间。氧枪枪位指从喷头端面到钢水熔池表面之间的垂直高度。冶炼过程中的最佳枪位难以确定,主要凭经验控制<sup>[5]</sup>。

### 1 实验条件与实验参数的确定

#### 1.1 相似条件

建立转炉水力学物理模型时,主要考虑原型与模型的几何相似和动力相似。

对于几何相似,主要考虑选择合适的相似比(实验时取为10:1),几何相似比可表示为:

$$m = L_p / L_m \quad (1)$$

式中: $L_p, L_m$ -原型及模型的几何尺寸/m。

动力相似:根据相似理论可知实验的相似准数为修正的Froude准数<sup>[6]</sup>。

$$\text{其表达式为: } Fr' = \frac{v_{gp}^2 \rho_g}{g d_0 \rho_L} \quad (2)$$

由  $Fr'_m = Fr'_p$ , 可得

$$\frac{v_m^2}{gL_m} \cdot \frac{\rho_{gm}}{\rho_{lm}} = \frac{v_p^2}{gL_p} \cdot \frac{\rho_{gp}}{\rho_{lp}} \quad (3)$$

$$\text{故 } \frac{Q_m}{Q_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{5/2} \cdot \left(\frac{\rho_{gp}}{\rho_{gm}}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\rho_{lm}}{\rho_{lp}}\right)^{1/2} \quad (4)$$

式中： $\nu_m, \nu_p$ - 模型与原型氧枪喷头气流的特征速度/ $(m \cdot s^{-1})$ ； $\rho_{gm}, \rho_{gp}$ - 模型与原型的气体密度/ $(kg \cdot m^{-3})$ ； $\rho_{lm}, \rho_{lp}$ - 模型与原型的液体密度/ $(kg \cdot m^{-3})$ ； $L_m, L_p$ - 模型与原型的特征尺寸/ $m$ ； $g$ - 重力加速度/ $(m \cdot s^{-2})$ ； $Q_m, Q_p$ - 模型和原型的气体流量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$ 。

### 1.2 实验用超音速氧枪喷头

射流氧枪的几何尺寸可由相似比计算得到,但此时产生的射流为亚音速流动情形,而实际生产中的射流为超音速射流,后者与前者相比相差一个射流核心区,过了核心区后二者的流动情况才完全相同<sup>[7]</sup>,故若用亚音速射流氧枪进行实验,则需进行枪位的修正。为了避免上述问题,本实验采用的是超音速射流氧枪(喷孔出口马赫数  $M_a = 2$ )模拟实验,使实验结果能更好的指导实际。实验使用氧枪喷头结构尺寸经设计计算<sup>[8]</sup>得到氧枪出口直径  $d_{出} = 4.1 \text{ mm}$ 。由于该尺寸较小,若做成四孔的氧枪喷头,加工比较困难,故该实验在能保证模型流量的基础上,将喷头制作成单孔形式,也能保证基本的几何相似。

### 1.3 模型参数的确定

通过式(1)、(4)计算得到实验时采用的几何参数和动力参数,列入表 1、表 2 中。

## 2 水模型实验

### 2.1 实验装置

按照鞍钢 180 t 转炉的设备实际情况,本实验中采用的几何相似比为 10 : 1,基本装置按几何相似比缩小制成,具体装置如图 1 所示。

### 2.2 四孔对称底吹水模型实验

(1) 实验方案。自 2003 年以来,鞍钢 180 t 转

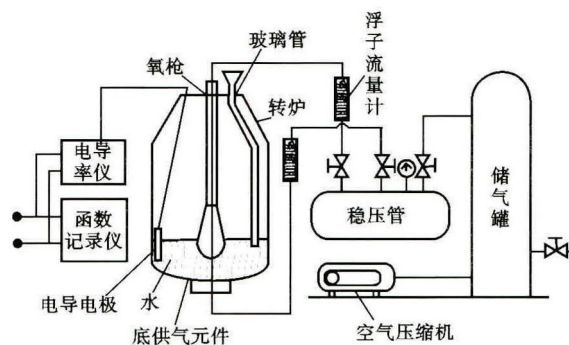


图 1 180 t 顶底复吹转炉模拟实验装置

Fig. 1 Simulated experimental device for an 180t top and bottom combined blowing converter

炉的底吹采用四孔对称喷吹工艺。其底部喷枪平面图如图 2 所示。

具体实验方案如下：

喷吹位置  $D_1 = 0.1, D_2 = 0.3, D_3 = 0.5, D_4 = 0.7, D_5 = 0.9$  ( $D_x$  表示喷嘴所在同心圆直径与转炉炉体熔池直径之比)。

底吹流量值分别为 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75  $m^3/h$ 。

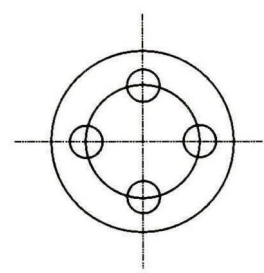


图 2 底部喷吹位置平面示意图

Fig. 2 Plane diagram of bottom blowing location

底吹流量值分别为 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75  $m^3/h$ 。

(2) 实验结果及分析。本实验通过改变底吹气体流量,底吹喷嘴位置,确定单纯底吹水模型实验最佳的底吹工艺参数。根据实验所得数据得到底吹的喷吹位置及气体流量对均匀混合时间的影响,如图 3 所示。

从图 3(a)中可以得到,底吹的喷吹位置对熔池均混时间的影响总趋势是随喷嘴的相对位置的增大均混时间增大。当底吹流量为 0.55、0.60、0.70  $m^3/h$ 时,随相对位置的变化均混时间曲线的波动较大,说明此时喷嘴的相对位置对熔池搅拌的影响较大;当底吹流量为 0.65  $m^3/h$ 时,除  $D_4(0.7)$  位置外,熔池的均混时间随喷吹位置的增加呈现递增的规律;而当底吹流量为最大流量 0.75  $m^3/h$ 时,熔池均混时间的曲线波动则较小,说明此时相对位置对熔池的作用影响较小;从整个曲线还可以看出,底吹条件下熔池均混时间的极小值出现在气体流量为 0.70  $m^3/h, D_2(0.3)$  的条件下。

从图 3(b)底吹气体流量对均混时间的影响可以看出,在距离熔池中心较远的位置时 [ $D_5(0.9), D_4(0.7)$  的喷吹位置],均混时间的曲线波动较大,

表 1 原型和模型几何尺寸

Table 1 Geometrical dimensions of prototype and model		尺寸/mm					底枪孔数
类别	熔池直径	熔池深度	氧枪喉口直径	氧枪出口直径	氧枪枪位		
原型	5 150	1 688	34	44.2	1 200 ~ 2 200	8	
模型	515.0	168.8	3.15	4.10	120 ~ 220	4	

表 2 顶吹及底吹的动力相似

Table 2 Dynamic similarity of top and bottom blowing		顶、底气体		气体密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	液体密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	气体流量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$
吹气方式	熔池液体	顶、底气体	气体	$(kg \cdot m^{-3})$	$(kg \cdot m^{-3})$	$(m^3 \cdot h^{-1})$
原型	钢液	氧气	氮气	1.43	7 000	顶吹 30 000 ~ 35 000 底吹 200 ~ 650
模型	水	空气	空气	1.29	1 000	顶吹 38 ~ 42 底吹 0.55 ~ 0.75

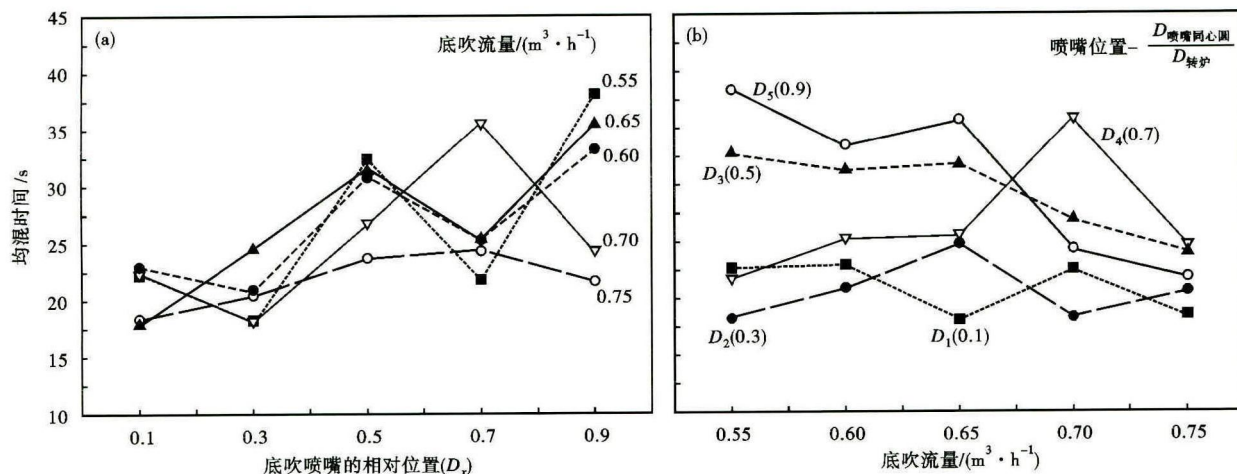


图3 底吹位置(a)和底吹气体流量(b)对熔池均混时间的影响  
Fig.3 Effect of bottom blowing location (a) and bottom blowing gas rate (b) on bath mixing time

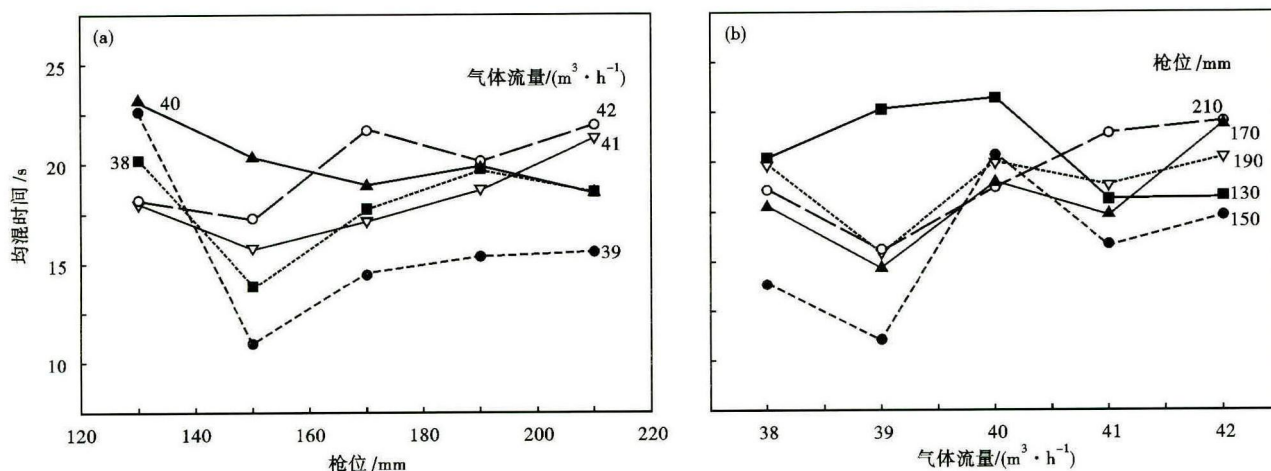


图4 顶吹氧枪的枪位(a)和顶吹气体流量(b)对转炉熔池均混时间的影响  
Fig.4 Effect of top oxygen lance level (a) and top blowing gas flow rate (b) on converter bath mixing time

说明此种条件下底吹气体的流量对熔池的搅拌作用较大。且在  $D_5(0.9)$  位置下的均混时间较长, 只在大流量  $0.70、0.75 \text{ m}^3/\text{h}$  时才相差不大; 而当  $D_3(0.5)$  时, 整个曲线呈现递减规律, 但幅度不大; 当喷吹位置为  $D_1(0.1)、D_2(0.3)$  的情况下, 熔池的均混时间受底吹气体流量及喷吹位置的双重影响。从整个曲线还可以看出, 熔池均混时间的极小值出现在  $D_2(0.3)$  的喷吹位置。

综上所述, 四孔对称喷吹时底吹的最佳位置是  $D_2(0.3)$ , 最佳流量是  $0.70 \text{ m}^3/\text{h}$ , 此条件下的均混时间为  $18.2 \text{ s}$ 。

### 2.3 复吹转炉水模型实验

(1) 实验方案。本实验是在保持最佳的底吹工艺参数下, 通过改变顶吹的气体流量及枪位高度来进行的, 主要考察复吹工艺参数对均混时间的影响。

具体的实验方案如下:

底吹气体流量  $0.70 \text{ m}^3/\text{h}$ , 底枪的位置  $D_2$ 。

顶吹气体流量采用  $38, 39, 40, 41, 42 \text{ m}^3/\text{h}$ ; 枪位值采用  $130, 150, 170, 190, 210 \text{ mm}$ 。

(2) 实验结果及分析。将实验中测得的数据绘成图表, 如图4所示, 从图4中可以直观地得出均匀混合时间同氧枪枪位和顶吹气体流量的关系。

从图4(a)氧枪枪位对混匀时间的影响可以看出, 随枪位的改变熔池的均混时间都能呈现出波动的趋势, 近似于“V”字形。除流量为  $42 \text{ m}^3/\text{h}$  外, 不同的顶吹流量下混匀时间随着枪位的升高呈现先减少后增加的趋势。除流量为  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  的情况外, 其余顶枪流量下的混匀时间在枪位为  $150 \text{ mm}$  处达到最低值; 而且, 当枪位从  $130 \text{ mm}$  提高到  $150 \text{ mm}$  的过程中, 不同流量下的均混时间均有所下降。枪位

到达 170 mm 后,混匀时间随枪位的升高变化不明显。流量为 40 m<sup>3</sup>/h 时混匀时间的最低点出现在枪位 170 mm 处,但和 150 mm 枪位处的混匀时间相差不大。

从图 4(b) 顶吹气体流量对均混时间的影响可以看出,除最高及最低两个枪位(枪位为 210 mm 和 130 mm)外,混匀时间随流量出现了上下波动的“W”字形,即随着流量的增加,混匀时间出现了最低值,而后又有增加;最高及最低两个枪位下,混匀时间都相对较长;除枪位为 130 mm 外,其余枪位下混匀时间在流量为 39 m<sup>3</sup>/h 时达到最佳值。当流量 ≥40 m<sup>3</sup>/h 时,对于不同的枪位,混匀时间上下波动不大,说明当流量很大时,枪位对混匀时间的影响已不显著;图中最佳枪位是 150 mm,最佳流量是 39 m<sup>3</sup>/h。

以上分析可以看出,顶吹气体流量和枪位对均混时间都有一定的影响。同一流量下,不同枪位影响均混时间的最大差为 12 s,平均差为 6.4 s;同一枪位下,不同流量影响均混时间的最大差为 11.6 s,平均差为 5.3 s。由此可见,在本实验工艺参数范围内,气体流量与枪位对均混时间都有较大的影响。最佳枪位是 150 mm,最佳流量是 39 m<sup>3</sup>/h,此时的均混时间为 12.6 s,与单纯底吹条件下的最佳混匀时间 18.2 s 比较,均混时间缩短了 5.6 s。实际冶炼过程中,若要增强熔池的搅拌效果,主要应对气体流量与枪位高度进行控制。

### 3 复合吹炼技术在鞍钢的实际应用

自 2008 年以来,鞍山钢铁股份有限公司 180 t 转炉一直采用顶底复合技术,其具体操作参数为顶枪气体流量 32 000 m<sup>3</sup>/h,顶枪压力 0.8 ~ 1.2 MPa,底枪流量 480 m<sup>3</sup>/h。采用复合吹炼后,180 t 转炉熔池的冶炼效果得到了明显的改善,熔池的均混时间与单纯底吹比较,大约降低了 25%,显著缩短了炼钢过程的实际吹炼时间,提高了企业的经济效益。

### 4 结论

(1) 单纯底吹条件下,底吹气体流量和喷吹位置对均混时间都有较大的影响,4 孔对称喷吹时底吹的最佳位置是  $D_2$ ,最佳流量是 0.70 m<sup>3</sup>/h,其均混

时间为 18.2 s,相当于实际吹炼的底吹流量为 594 m<sup>3</sup>/h。

(2) 复合吹炼条件下,熔池均混时间受顶吹气体流量和枪位的双重影响。最佳的工艺参数是枪位为 150 mm,气体流量 39 m<sup>3</sup>/h,均混时间 12.6 s,相当于实际枪位 1 500 mm,流量 30 800 m<sup>3</sup>/h。

(3) 通过顶底复吹和单纯底吹条件的水模型实验比较看出,在保持底吹最佳吹炼工艺参数不变的情况下,增加顶吹工艺,对熔池的均混时间起到了明显的效果,使均混时间减少了 5.6 s,这对于炼钢过程来说,缩短了熔池的搅拌时间,能够显著地提高经济效益。

(4) 通过实验还可以看出,喷吹的气体流量、氧枪枪位是氧枪与炼钢熔池相互作用的两个重要因素,它们的变化将引起均混时间的变化,是实际生产中需慎重考虑的两个工艺参数,对冶炼效果有着重要的影响。

(5) 顶底复合吹炼技术在鞍钢的实际应用,取得了良好的冶炼效果,提高了企业的经济效益。

### 参考文献

- [1] 吴凤林,蔡扶时. 顶吹转炉氧枪设计[M]. 北京:冶金工业出版社,1982.
- [2] 蔡志鹏,谢裕生,夏安武. 氧气炼钢过程中射流对熔池的作用[J]. 钢铁,1980,15(1):14-19.
- [3] 刘漠川,金光南,郝宝升,等. 侧底复吹转炉的水力学研究[C]. 首届全国青年冶金学术交流会论文集. 北京:冶金工业出版社,1990:192-195.
- [4] 刘爱华,李强,冯明霞,等. LBE 转炉优化吹炼工艺参数的水模型实验研究[J]. 材料与冶金学报,2003,2(1):21-24.
- [5] 徐文派. 转炉炼钢学[M]. 北京:冶金工业出版社,1986.
- [6] 包丽明. 聚合射流氧枪与熔池相互作用的水模型研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2009.
- [7] 蔡志鹏,马恩祥,钱占民,等. 氧气炼钢过程中射流与熔池作用的某些传递现象[J]. 化工冶金,1983,4(1):37-47.
- [8] 包丽明,刘坤,吕国成. 180 t 转炉聚合射流流场的水力学模型的实验研究[J]. 特殊钢,2014,35(3):11-14.

包丽明(1983-),女,硕士(辽宁科技大学),讲师,2006 年鞍山科技大学(本科)毕业,冶金传输研究。

E-mail:baoliming0916@163.com

收稿日期:2015-02-23