

180 t 转炉聚合射流流场的水力学模型的实验研究

包丽明¹ 刘坤² 吕国成¹

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

摘要 采用几何相似比1:10水模型对180 t顶底复吹转炉内射流与熔池相互作用进行模拟试验,研究了在最佳枪位(150 mm)时氧气流量(38~42 m³/h)对均混时间的影响以及最佳顶枪流量(39 m³/h)下聚合射流氧枪枪位(40~150 mm)对均混时间的影响。结果表明,聚合射流氧枪对熔池的搅拌效果完全能达到顶底复吹的搅拌效果,如能在转炉冶炼工艺中应用,可取消底吹系统,简化转炉设备,提高转炉炉龄。

关键词 转炉 聚合射流 均混时间 气体流量 氧枪枪位 水模型

Experimental Study on Hydraulic Model of Coherent Jet Flow Field in 180 t Converter

Bao Liming¹, Liu Kun² and Lü Guocheng¹

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

Abstract Simulation test on interaction between jet flow and bath in 180 t top and bottom combined blowing converter has been carried out by a water model with geometric similarity ratio 1:10 to study the effect of gas flow rate (38~42 m³/h) on mixing time with optimum lance position (150 mm) and the effect of coherent jet flow lance position (40~150 mm) on mixing time at optimum top lance flow rate (39 m³/h). Results show that the stirring effect in bath by coherent jet flow oxygen lance is the same as that by top and bottom combined blowing and if the coherent jet flow oxygen lance shall be applied in converter, the bottom system of top and bottom combined blowing converter could be canceled to simplify converter structure and increase converter lining life.

Material Index Converter, Coherent Jet, Mixing Time, Gas Flow Rate, Oxygen Lance Position, Water Model

氧气经过氧枪喷头流出,形成了氧射流,氧射流经过高温炉气,冲击在铁水熔池表面上,或穿入熔池,引起了熔池铁水运动,起机械搅拌作用^[1-2]。机械搅拌作用的强弱、均匀程度则取决于射流与熔池相互作用的情况。因此,研究射流与熔池相互作用问题,对于了解转炉的工作原理和指导实际冶炼有着重要的意义。

根据鞍钢180 t复吹转炉的实际生产情况,为了达到冶炼所要求的均混时间需要确定最佳吹炼工艺参数,即最佳的顶、底吹气体流量、最佳的氧枪枪位和底枪布置,进行了复吹转炉内射流与熔池相互作用的模型实验。以降低枪位(即提高射流到达液面马赫数)模拟聚合射流氧枪的冶炼效果。结果表明,在保持相同气体流量的条件下,聚合射流氧枪可达到顶底复吹的搅拌效果,可取消底吹系统,简化转炉设备,提高转炉炉龄,可带来炼钢技术的变革。

1 实验装置与实验条件

1.1 实验装置

实验中采用的几何相似比为1:10,按照鞍钢

180 t转炉的设备实际情况,实验中的基本装置按几何相似比缩小制成,具体装置如图1所示。

鞍钢180 t转炉的结构及操作参数如表1。

1.2 实验条件

(1)实验用氧枪喷头的设计。实验采用的是超音速射流氧枪(喷孔出口马赫数 $Ma=2$)模拟实验。实验使用氧枪喷头结构尺寸设计如下:

根据相似理论可知实验的相似准数为修正的

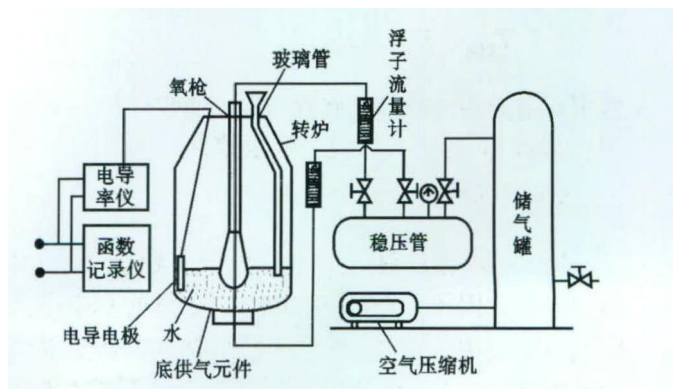


图1 180 t复吹转炉模拟实验装置

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

表 1 复吹转炉的结构及操作参数

Table 1 Parameters of structure and operation of top and bottom combined blowing converter

项目	参数
顶枪枪位/cm	120~220
顶枪流量/(m ³ ·h ⁻¹)	32 000
顶枪压力/MPa	0.8~1.2
底枪流量/(m ³ ·h ⁻¹)	480
熔池直径/mm	5 150
熔池深度/mm	1 680

Froude 准数^[3],其表达式为:

$$Fr' = \frac{v_{gs}^2 \rho_g}{g d_0 \rho_L} \quad (1)$$

$$\text{由 } Fr'_m = Fr'_p, \text{ 可得: } \frac{v_m^2}{gL_m} \cdot \frac{\rho_{gm}}{\rho_{lm}} = \frac{v_p^2}{gL_p} \cdot \frac{\rho_{gp}}{\rho_{lp}} \quad (2)$$

$$\text{故 } \frac{Q_m}{Q_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{5/2} \cdot \left(\frac{\rho_{gp}}{\rho_{gm}}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\rho_{lm}}{\rho_{lp}}\right)^{1/2} \quad (3)$$

式中: v_m, v_p -模型与原型氧枪喷头气流的特征速度/(m·s⁻¹); ρ_{gm}, ρ_{gp} -模型与原型的气体密度/(kg·m⁻³); ρ_{lm}, ρ_{lp} -模型与原型的液体密度/(kg·m⁻³); L_m, L_p -模型与原型的特征尺寸/m; g -重力加速度/(m·s⁻²); Q_m, Q_p -模型和原型的气体流量/(m³·h⁻¹)。

实验采用的几何相似比为1:10,原型的气体流量为 $Q_p = 32\,000 \text{ m}^3/\text{h} = 11.466\,705\,62 \text{ kg/s}$,将有关参数代入上式得到模型的气体流量。

$$Q_m = 40.27 \text{ m}^3/\text{h} = 0.144\,298\,33 \text{ kg/s}$$

根据流量的计算公式来设计氧枪的尺寸:

$$Q_m = \sqrt{\frac{k}{R}} \cdot \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} M \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{-\frac{k+1}{2(k-1)}} \cdot F_* \cdot \text{kg/s} \quad (4)$$

在氧枪喉口处 $M = 1$,对于空气而言, $R = 287.14, k = 1.4$ 。

将数值代入上式中,经化简得到喷管内最大流量与喉口面积之间的关系如下:

$$Q_m = 0.040\,41 \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \cdot F_* \cdot \text{kg/s} \quad (5)$$

由工艺要求出口处 $Ma = 2$,查等熵流表,有

表 2 原型和模型几何尺寸

Table 2 Geometrical dimensions of protocol converter and water model

项目	熔池直径/ mm	熔池深度/ mm	氧枪孔 数/个	氧枪喉口 直径/mm	氧枪出口 直径/mm	拉瓦尔 夹角/°	氧枪枪位/ mm
原型	5 150	1 688	4	34	44.2	11.5	1 200~2 200
模型	515.0	168.8	1	3.15	4.10		120~220

$P/P_0 = 0.127\,8$,则: $P_0 = 0.101\,35/0.127\,8 = 0.796 \text{ MPa}, T_0 = 298 \text{ K}$,所以喉口面积:

$$F_* = \frac{Q_m \cdot \sqrt{T_0}}{0.040\,41 P_0} = \frac{0.144\,298\,33 \times \sqrt{298}}{0.040\,41 \times 0.796 \times 10^6} = 7.80 \text{ mm}^2$$

从而喉口直径为:

$$d_* = \sqrt{\frac{4F_*}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 7.80}{3.14}} = 3.15 \text{ mm} \quad (6)$$

由 $Ma = 2$,查表有 $F_{\text{出}}/F_* = 1.688$,故 $F_{\text{出}} = 13.166\,4 \text{ mm}^2$,则出口直径:

$$d_{\text{出}} = \sqrt{\frac{4F_{\text{出}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 13.166\,4}{3.14}} = 4.1 \text{ mm} \quad (7)$$

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。

(2)实验用模型几何尺寸设计。根据几何相似,可计算出模型的几何尺寸(几何相似比为1:10)。以熔池直径为例:对于原型 $d_p = 5\,150 \text{ mm}$,

$$\text{则有: } d_m = \frac{d_p}{L} = \frac{5\,150}{10} = 515 \text{ mm}$$

用同样的方法可计算出模型的其它几何尺寸,将计算结果列入表2。

实验中采用的氧枪枪位值分别为:130、150、170、190、210 mm。

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

1.3 模型供气参数确定

顶吹氧枪实际流量为 $32\,000 \text{ m}^3/\text{h}$,底吹流量为 $480 \text{ m}^3/\text{h}$,本实验中分别采用 $30\,000 \sim 35\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $200 \sim 650 \text{ m}^3/\text{h}$ 作为模拟现场的实际流量范围。以此进行对比实验,得出顶、底吹气体流量对均混时间、冲击深度及喷溅量等的影响^[4]。由式(2)以及流体的物理参数值得到流体动力相似的结果如表3所示。

在实验中采用的顶吹气体流量为:38、39、40、41、42 m³/h;底吹气体流量为:0.55、0.60、0.65、0.70、0.75 m³/h。

2 实验的理论依据

以往人们采用枪位修正的方

表3 动力相似的结果

Table 3 Results of dynamic similarity

吹气方式	熔池液体	顶底气体	气体密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	液体密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	气体流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	
					顶吹	底吹
原型	钢液	氧气 氮气	1.43 1.25	7 000	30 000 ~ 35 000	200 ~ 650
模型	水	空气	1.29	1 000	38 ~ 42	0.55 ~ 0.75

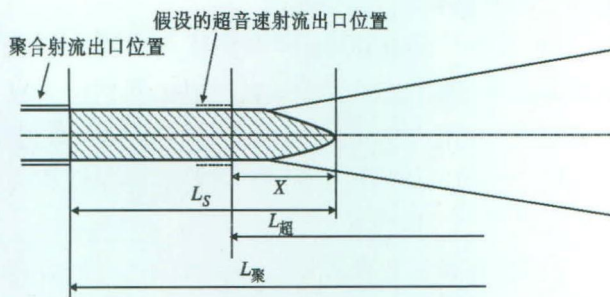


图2 模型超音速射流氧枪模拟聚合氧枪聚合射流示意图
Fig. 2 Schematics of coherent jet flow of coherent jet simulated by model supersonic jet

法^[5],以亚音速氧枪模拟超音速射流氧枪,实验以超音速射流氧枪模拟聚合射流氧枪,其结构如图2。

由图2可以看出,有式(8)的关系式成立:

$$L_{\text{聚}} = L_{\text{超}} + L_s - x \quad (8)$$

式中: $L_{\text{聚}}$ - 聚合射流氧枪枪位/m; $L_{\text{超}}$ - 传统超音速射流氧枪枪位/m; L_s - 聚合射流氧枪超音速区长度/m; x - 传统射流氧枪超音速区长度/m。

由此可以看出,聚合射流与传统的超音速射流相比,多了一个射流核心区^[6],可以保证射流在较长的距离内保持着出口的流速,即聚合射流在理论上可以达到顶底复吹的搅拌效果,加强熔池的搅拌,取消底吹系统。

因为顶底复吹转炉的水力学模型实验的最佳枪位^[4]是150 mm,而氧枪的出口直径 $De = 4.1$ mm,则 $X/De = 36.58$,当主孔压力为0.796 MPa,伴随流压力为0.20 MPa,则由副孔伴随流在不同的滞止压力下,射流中心线上速度分布的模拟结果^[7]可查该实验取得 $Um/Ue = 0.85$ 。

在设计工况条件下(即 $n = 1.00$ 时),由传统超音速射流中心线上速度变化的数值模拟结果^[7]可查该实验当 $Um/Ue = 0.85$ 时, $X/De = 10$ 。由于 $De = 4.1$ mm,所以 $X = 41$ mm。

因为聚合射流氧枪技术的冲击面积的变化很小,而传统超音速射流在41 mm低枪位时,冲击面积的变化也很小,所以可以忽略聚合射流和传统超音速射流的冲击面积差距。则从不同滞止压力下射

流中心线上速度分布和传统超音速射流中心线上速度变化的数值模拟结果^[7]推导可知,当传统超音速射流的枪位到达41 mm时,与聚合射流氧枪的枪位在150 mm时的搅拌效果相当,这就证明传统超音速射流可以通过改变枪位来模拟聚合射流。

3 水模拟实验

根据鞍钢180 t复吹转炉底吹及顶吹的实际生产情况,在相似理论的指导下,进行了聚合射流氧枪与炼钢熔池相互作用的水力学模型实验,实验方案和实验结果如下。

3.1 实验方案

由顶底复吹的水力学模型实验数据的分析可知^[5,7]:顶吹气体流量与枪位对均混时间都有较大的影响,最佳的枪位是150 mm,在这个枪位下,均混时间和流量的关系如图3所示。由图3可知,最短的混匀时间只有11 s,该时间对应的最佳枪位是150 mm,最佳流量是39 m^3/h ,此参数即为最佳的顶底复吹工艺参数,相当于实际枪位1 500 mm,流量30 800 m^3/h 。由图3还可以看出,均混时间并不是随着枪位的降低和流量的增加而单调减少。这是由于熔池的均混时间受气体流量和氧枪枪位的共同影响,需要二者有一个很好的配比才能达到最佳的冶炼效果,这与实际中不断的变换枪位来进行冶炼的操作是相吻合的。

3.2 结果分析

在保持复吹最佳顶枪流量39 m^3/h 的同时,将底枪堵死,以最佳枪位150 mm为基础,将顶枪的枪位每次降10 mm用来模拟聚合射流,进行冷态的水模拟实验,记录5次实验数据,然后求平均值;枪位直至降到小于顶底复吹的均混时间为止,其结果

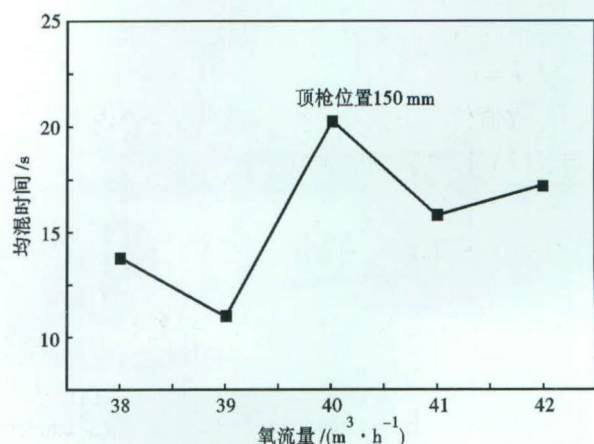


图3 最佳枪位下流量对均混时间的影响
Fig. 3 Effect of flow rate on mixing time with optimum top lance position

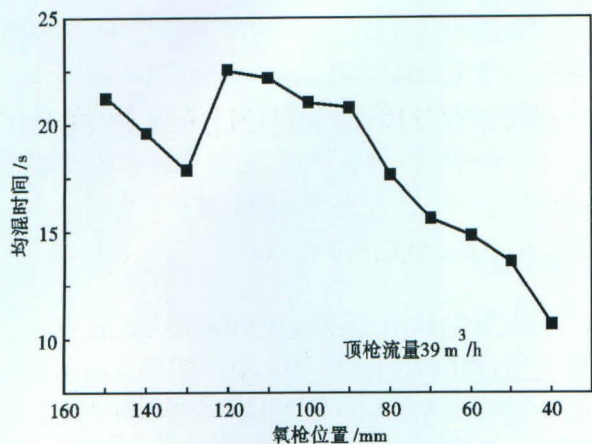


图 4 在最佳流量下顶枪位置对均混时间的影响

Fig. 4 Effect of top lance position on mixing time at optimum flow rate

如图 4 所示。

从图 4 中可以看出：

(1) 当枪位大于 120 mm 时,均混时间先减少而后又开始增长;这是由于顶底复吹转炉中的氧枪最佳枪位高于纯顶吹的最佳枪位^[8](由底吹的作用导致的);

(2) 枪位从 120 mm 开始,均混时间与枪位的关系趋于直线,这是由于射流的冲击深度和冲击面积共同决定了熔池的均混时间,当流量保持不变,枪位不断下降时,冲击面积对均混时间的影响越来越小,则影响均混时间的主要因素只有冲击深度;

(3) 当顶枪枪位小于 90 mm 之后,可显著改善搅拌效果;当顶枪枪位为 40 mm 时,射流到达液面的马赫数很大,对熔池的搅拌能力也很大,均混时间为 10.6 s,与顶底复吹的搅拌能力相当接近。这是由于随着枪位的下降,实验逐步接近于聚合射流的搅拌情况,均混时间则一度呈现下降的趋势。得出聚合射流氧枪可以在与顶底复吹技术搅拌效果相当的情况下,取消底吹系统。

4 结论

(1) 在顶底复吹转炉水力学模型实验最佳顶枪

枪位及最佳流量下,纯顶吹均混时间为 21.2 s,顶底复合吹炼的均混时间为 11 s,表明顶底复合吹炼可明显改善转炉搅拌效果。

(2) 在保持顶底复吹转炉水力学模型实验最佳流量时,当顶枪枪位降至 120 mm 时,随枪位再降低,均匀混合时间明显缩短,表明聚合射流氧枪可改善转炉搅拌效果。

(3) 当枪位降到 40 mm(即到达液面的马赫数与聚合射流氧枪枪位在 150 mm 时射流到达液面的马赫数相当的枪位)时,均匀混合时间为 10.6 s,小于顶底复吹的最佳均混时间 11 s,表明聚合射流氧枪可改善转炉搅拌效果。

(4) 聚合射流氧枪在转炉中的应用,可取消底吹系统,延长转炉寿命,并能够解决底吹转炉寿命与溅渣护炉技术转炉寿命不同步,影响转炉冶炼效率的难题。

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] 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,2009,24-26.

[4] 包丽明,刘 坤,吕国成,等. 复吹转炉射流与钢水熔池相互作用的水模型试验[J]. 特殊钢,2008,29(5):32-34.

[5] 冯春荣,杨伟健. 氧气顶吹炼钢中射流穿透深度的研究和理论分析[C]. 氧枪文集,1986:23-24.

[6] 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.

[7] 刘 坤. 超音速聚合射流氧枪射流行为特征的数学物理模拟研究[D]. 沈阳:东北大学,2008.

[8] 包丽明,刘 坤,吕国成,等. 转炉氧枪顶吹工艺的水力学研究[J]. 特殊钢,2007,28(5):13-15.

包丽明(1983-),女,硕士(辽宁科技大学),讲师,2006年辽宁科技大学(本科)毕业,冶金工艺研究。

E-mail:baoliming0916@163.com

收稿日期:2013-12-27

欢迎订阅《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社