

· 试验研究 ·

工艺参数对 120 t 转炉顶底复吹影响的水模型研究和应用

韩楚菲 沈明钢 杨 晨

(辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051)

摘 要 进行了 120 t 转炉几何相似比 1: 7 的 4 因素 5 水平正交水模型实验, 研究氧枪距离熔池高度 (200 ~ 280 mm)、顶氧枪流量 (72.5 ~ 99.0 m³/h)、底吹流量 (0.8 ~ 2.4 m³/h)、底吹气孔 (4 ~ 8 孔) 位置分布对转炉顶底复吹的影响。结果表明, 底吹气孔位置分布是影响熔池搅拌效果的最重要的因素。当选取氧枪距熔池高度 $h = 240$ mm, 顶枪吹气流量 $Q_1 = 99.0$ m³/h, 底吹气流量 $Q_2 = 2.4$ m³/h, 底吹气孔 (6 孔) 位置 $D(4)$ 时, 熔池搅拌效果最佳。120 t 转炉顶底复吹生产 Q235B 钢应用结果得出, 顶吹流量 25 000 m³/h, 底吹流量 560 ~ 800 m³/h, 底吹 6 孔布置吹炼 14 ~ 16 min, 钢水终点 [C] 0.14% ~ 0.18%, 碳氧积 0.002 3 ~ 0.002 5, 熔池搅拌效果良好。

关键词 120 t 转炉顶底复吹 水模型 工艺参数 搅拌效果

Water Model Study on Effect of Process Parameters on Top and Bottom Combined Blowing of 120 t BOF and Application

Han Chufei, Shen Minggang and Yang Chen

(School of Materials and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051)

Abstract Orthogonal experiment with 4 factors and 5 levels by using 120 t BOF geometric similarity 1: 7 water model has been carried out to study the effect of height of oxygen lance from pool (200 ~ 280 mm), top lance flow rate (72.5 ~ 99.0 m³/h), bottom blowing flow rate (0.8 ~ 2.4 m³/h) and distribution of bottom blowing holes (4 ~ 8 holes) position on BOF top and bottom combined blowing. Results show that distribution of bottom blowing holes position is most important factor to influence the mixing effect of liquid pool, with height of oxygen lance from pool $h = 240$ mm, top lance flow rate $Q_1 = 99.0$ m³/h, bottom blowing flow rate $Q_2 = 2.4$ m³/h and 6 holes bottom blowing position $D(4)$, the mixing effect of liquid pool is best. The results of steel Q235B production application of 120 t BOF top and bottom combined blown obtain that with top blowing rate 25 000 m³/h, bottom blowing rate 560 ~ 800 m³/h and bottom blowing by 6 holes distribution the liquid end [C] is 0.14% ~ 0.18% and the carbon oxygen product is 0.002 3 ~ 0.002 5 by blowing for 14 ~ 16 min to get better pool mix effect.

Material Index 120 t BOF Top and Bottom Combined Blowing, Water Model, Process Parameters, Mixing Effect

转炉顶底复吹的炼钢工艺是结合转炉顶吹工艺和转炉底吹工艺相结合, 综合两者的优点和克服两者的缺点而发展起来的炼钢方法^[1-3]。转炉顶底复吹工艺主要的影响因素研究, 对于改善熔池搅拌效果, 满足不同吹炼阶段对冶金反应动力学条件的要求, 达到吹炼平稳, 缩短冶炼时间, 提高冶炼效率, 降低终点钢液含氧量和炉渣氧化铁量, 降低炼钢成本, 具有深远意义^[4-6]。以 120 t 转炉 1: 7 的比例进行 4 因素 5 水平正交水模型实验模拟转炉炼钢过程, 以便得到 120 t 转炉顶底复吹最重要的影响因素。

1 实验方法及原理

实验装置是以 120 t 转炉为原型, 以 1: 7 的比例建立实验室转炉水模型, 使用铜质 5 孔氧枪喷头, 检

测器材为中国水利水电科学研究院生产的 DJ800 多功能监测系统, 系统包括: 电导电极、电导率仪、功率放大器和带模/数转换卡的计算机组成的数据记录系统。实验药品为饱和的 NaCl 溶液、注入医用针管。实验装置图如图 1、转炉底吹分布图如图 2。

在建立转炉顶底复吹物理模型时, 要保证模型与原型的动力相似, 实验参数见表 1, 则原型的修正 Froude 准数 (Fr'_m) 与原型的修正 Froude 准数 (Fr'_p) 相等^[7]。即 $Fr'_m = Fr'_p$

$$\frac{\mu_m^2}{gL_m} \cdot \frac{\rho_{gm}}{\rho_{lm}} = \frac{\mu_p^2}{gL_p} \cdot \frac{\rho_{gp}}{\rho_{lp}} \quad (2)$$

$$\frac{\mu_m}{\mu_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{1/2} \left(\frac{L_{gp}}{L_{gm}}\right)^{1/2} \left(\frac{\rho_{lm}}{\rho_{lp}}\right)^{1/2} \quad (3)$$

通讯作者: 沈明钢, 教授, 辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051

E-mail: lnassmg@163.com

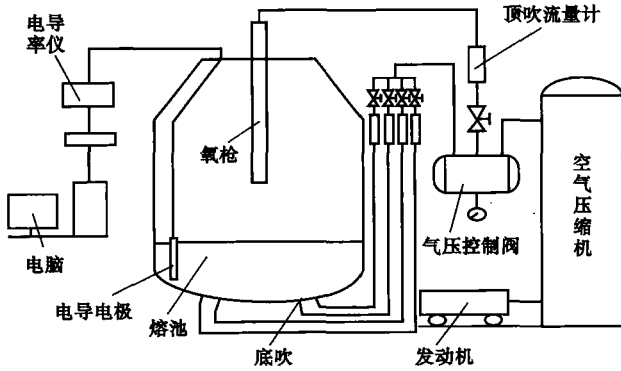


图 1 120 t 转炉顶底复吹水力学模型实验装置示意

Fig.1 Schematics of experimental device of water model for 120 t BOF top and bottom combined blowing process

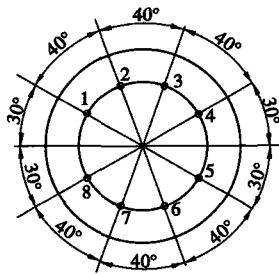


图 2 120 t 转炉顶底复吹水力学模型底吹分布
Fig.2 Distribution of bottom blowing holes of water model for 120 t BOF top and bottom combined blowing process

式中： μ_m, μ_p - 模型与原型氧枪喷头气流的速度/ $(m \cdot s^{-1})$ ； ρ_{gm}, ρ_{gl} - 模型与原型的气体密度/ $(kg \cdot m^{-3})$ ； ρ_{lm}, ρ_{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/ $(m \cdot s^{-2})$ 。由方程 (2) 可知，通过计算得到模型气体流量 Q_m 与原型气体流量 Q_p 的

关系：

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

式中： Q_m, Q_p - 模型和原型的气流量(标态)/ $(m^3 \cdot h^{-1})$ 。

建立 4 因素 5 水平正交水模型实验，确定各因素影响顺序及较优实验参数，实验参数选取见表 2。

2 实验结果分析

2.1 底吹气孔分布位置和底吹流量对混匀时间的影响

由表 3 可以看出，随着底吹流量的增大，熔池搅拌能增加，混匀时间缩短，当底吹气体流量小于 $2.0 m^3/h$ 时，混匀时间随底吹流量增大变化较快，当继续增加底吹气体流量到 $2.0 \sim 2.4 m^3/h$ ，底吹气体的搅拌能一部分用于转炉熔池喷溅，因此混匀时间继续减小，但效果不是很明显。从表 3 中还可以看出，六孔 $D(3), D(4)$ 的搅拌效果要好于四孔 $D(1)$ ，

$D(2)$ 搅拌，八孔 $D(5)$ 的搅拌效果没有明显变化，这是因为当气流总体大小不变的情况下，一定程度的分流有利于气体。

2.2 氧枪参数对熔池混匀时间的影响

由表 4 可知，低氧枪高度下(小于 240 mm)，随着氧枪流量的增加，混匀时间先减小，后增加，这是因为，在低枪位条件下，氧枪流量过大，则喷射出的气流与钢液面冲击产生的接触面积减小，部分气流来不及搅拌，直接上升逸出；氧枪枪位升高，随氧气流量的增加，混匀时间缩短。在相同气体流量的条件下，存在最佳枪位。枪位过低，会引起钢液喷溅增

表 1 生产实践原型与水模型相关参数

Table 1 Relative parameters of production prototype and water model

项目	物质	液体密度/ $(kg \cdot m^{-3})$		气体密度/ $(kg \cdot m^{-3})$		气体流量(标准)/ $(m^3 \cdot h^{-1})$
		顶吹	底吹	顶吹	底吹	
原型	钢水	7 000		$O_2: 1.43$	$N_2: 1.36$	顶吹: 24 200 ~ 33 000 底吹: 265 ~ 800
模型	水	1 000		空气: 1.29	空气: 1.29	顶吹: 72.5 ~ 99.0 底吹: 0.8 ~ 2.4

表 2 转炉顶底复吹水模型正交试验因素和水平

Table 2 Factors and levels of water model orthogonal experiment for BOF top and bottom combined blowing process

氧枪距离熔池高度(A)/mm	氧枪流量(B)/ $(m^3 \cdot h^{-1})$	底吹流量(C)/ $(m^3 \cdot h^{-1})$	底吹气孔位置分布(D)
200	72.5	0.8	$D(1)$ 四孔 1357
220	78.0	1.2	$D(2)$ 四孔 1458
240	83.0	1.6	$D(3)$ 六孔 123456
260	88.5	2.0	$D(4)$ 六孔 123567
280	99.0	2.4	$D(5)$ 八孔 12345678

表 3 水模型底吹气孔分布位置和底吹流量对混匀时间的影响

Table 3 Effect of distribution location of bottom blowing holes and bottom flow rate of water model on mixing time of liquid

底吹流量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$	底吹位置的混匀时间/s				
	$D(1)$	$D(2)$	$D(3)$	$D(4)$	$D(5)$
0.8	55	55	45	43	47
1.2	40	41	26	25	34
1.6	35	35	23	23	26
2.0	31	32	21	19	21
2.4	30	33	19	17	20

表 4 水模型氧枪高度与氧枪流量对混匀时间的影响 /s

Table 4 Effect of water model height of lance from pool and lance flow rate on mixing time of liquid /s

氧枪位置/mm	顶吹流量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$				
	72.5	78.0	83.0	88.5	99.0
200	40	30	19	20	40
220	35	20	22	35	36
240	30	25	25	20	17
260	45	40	35	25	20
280	50	45	45	30	40

表 5 120 t 转炉顶底复吹水模型正交实验结果

Table 5 Orthogonal experiment results of water model for 120 t BOF top and bottom combined blowing process

序号	1A	2B	3C	4D	混匀时间/s
1	1	1	1	1	53.7
2	1	2	2	2	42.5
3	1	3	3	3	48.3
4	1	4	4	4	40
5	1	5	5	5	21.5
6	2	1	2	3	54
7	2	2	3	4	24.5
8	2	3	4	5	48
9	2	4	5	1	35.5
10	2	5	1	2	39.5
11	3	1	3	5	48
12	3	2	4	1	34
13	3	3	5	2	35
14	3	4	1	3	50
15	3	5	2	4	25
16	4	1	4	2	36
17	4	2	5	3	37.6
18	4	3	1	4	41
19	4	4	2	5	43
20	4	5	3	1	43
21	5	1	5	4	41
22	5	2	1	5	43.3
23	5	3	2	1	35
24	5	4	3	2	35
25	5	5	4	3	43
均值 K1	206	232.7	227.5	201.2	
均值 K2	201.5	181.9	199.5	188	
均值 K3	192	207.3	198.8	232.9	
均值 K4	200.6	203.5	204.5	171.5	
均值 K5	197.3	172	170.6	203.8	
极差 R	14	60.7	56.9	61.35	

表 6 验证实验参数及实验结果

Table 6 Verified experimental parameters and experimental results

氧枪距离熔池高度(h)(A)/mm	氧枪流量(Q_1)(B)/($m^3 \cdot h^{-1}$)	底吹流量(Q_2)(C)/($m^3 \cdot h^{-1}$)	底吹气孔位置分布(D)
240	99	2.4	D(4)六孔 123567
实验数据	16.8 s	17 s	17.2 s

加,因此氧枪枪位高度不能过低,选择较优枪位为距离熔池高度 240 mm。

2.3 120 t 转炉顶底复吹影响因素

表 5 实验数据表明,不同的氧枪枪位,氧枪流量,底吹流量和底吹气孔分布位置,混匀时间不同;当底吹流量达到 $2.4 m^3/h$ 时候混匀时间最短;因此,转炉顶底复吹的过程与混匀时间是与排列有关的。由正交表极差分析可知, $R_4 > R_2 > R_3 > R_1$,即底吹分布影响因素 > 氧枪流量影响因素 > 底吹流量影响因素 > 氧枪距离熔池高度影响因素,经过正交计算 120 t 转炉顶底复吹最优解为 A3B5C5D(4),不在正交实验表内,因此需进行验证实验。验证实验参数及实验结果如表 6 所示。3 次实验平均混匀

时间 17 s,为实验条件下的最佳工艺参数。

2.4 水模拟结果的生产应用

优化钢厂 120 t 顶底复吹转炉冶炼 Q235B 钢生产工艺参数,转炉底枪布置如图 3 所示,顶吹流量为 $25000 m^3/h$,根据吹炼阶段调整底吹气体流量,由吹炼初期 $560 m^3/h$ 增至吹炼末期 $800 m^3/h$,吹炼时间缩短至 14 ~ 16 min,钢液终点 [C] 范围在 0.14% ~ 0.18%,碳氧积在 0.0023 ~ 0.0025,转炉内熔池搅拌效果良好,满足实际工业生产冶炼需求。

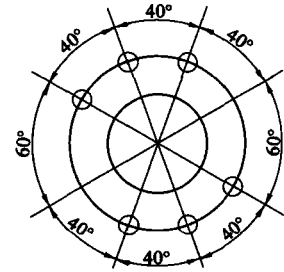


图 3 120 t 转炉底吹气孔位置分布简图

Fig. 3 Schematics of distribution of bottom blowing holes of 120 t top and bottom combined blown BOF at steel works

3 结论

影响 120 t 转炉顶底复吹影响因素顺序为:底吹分布影响因素 > 氧枪流量影响因素 > 底吹流量影响因素 > 氧枪距离熔池高

度影响因素,底吹气孔位置分布是影响熔池搅拌效果的最重要的影响因素。在转炉炼钢生产中,可以通过优化转炉的底吹气孔分布位置 D(4),提高顶吹气体流量($Q_1 = 99 m^3/h$)和底吹气体流量($Q_2 = 2.4 m^3/h$),调整氧枪距离熔池的高度($h = 240 mm$),从而缩短吹炼时间,提高生产效率,降低生产成本。

参考文献

- [1] 倪红卫,喻淑仁,邱玲慧,等. 90 t 复吹转炉水模实验研究[J]. 炼钢,2002,18(3):39-43.
- [2] 王小峰,吕亚刘,谢磊,等. 150 t 顶底复吹转炉全程底吹氮气的工艺探讨[J]. 冶金丛刊,2003,207(5):14-17.
- [3] 杨宁川,王承宽,韦亮. 顶底复合吹炼转炉工艺技术的开发与应用[J]. 钢铁技术,2003(1):7-11.
- [4] 曾加庆,潘贻芳,王立平,等. 对复吹转炉低成本、高效化生产洁净钢水理论与实践的再认识[J]. 炼钢,2014,49(10):1-6.
- [5] 刘彭,罗钢,吴平辉,等. 210 吨转炉复吹工艺优化及效果研究[J]. 涟钢科技与管理,2014(4):6-8.
- [6] 李勇,吴伟,朱启柱,等. 转炉顶吹与复合吹炼条件下冶金效果的对比[J]. 辽宁科技大学学报,2010,12(3):4-8.
- [7] 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.

韩楚菲(1991-),女,硕士研究生,2013 年辽宁科技大学(本科)毕业,炼钢工艺研究。E-mail:765269939@qq.com

收稿日期:2016-08-01