

唐钢 50 t 复吹转炉水模型的实验研究

曾亚南¹ 李俊国¹ 韩志杰² 李守章¹ 吴雨晨¹

(1 河北理工大学冶金与能源学院,唐山 063009; 2 唐山钢铁股份有限公司,唐山 063016)

摘要 针对唐钢 50 t 复吹转炉,采用 1:6.35 水模型的正交试验,研究了氧枪枪型、枪位、顶吹流量和底吹流量对熔池混匀时间、穿透深度、冲击面积和喷溅量的影响。结果表明,与 4 孔氧枪相比,使用改进后的 4 孔变角氧枪可增加对熔池的冲击面积,降低穿透深度和炉口溅出量,缩短混匀时间。对于 50 t 复吹转炉实际枪位 ≤ 1.3 m,有利于缩短冶炼时间,提高冶炼强度;顶吹流量控制在 $13\,000 \sim 14\,000$ m³/h,可缩短混匀时间和减少炉口溅出量。

关键词 4 孔变角氧枪 转炉 水模型 混匀时间 喷溅量

Experimental Study on Water Model for a 50 t Top and Bottom Combined Blown Converter at Tangsteel

Zeng Yanan¹, Li Junguo¹, Han Zhijie², Li Shouzhong¹ and Wu Yuchen¹

(1 College of Metallurgy and Energy, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009;

2 Tangshan Iron and Steel Co Ltd, Tangshan 063016)

Abstract Effect of oxygen lance nozzles, lance level, top blowing rate and bottom blowing rate on bath mixing time, penetrating depth, impact area and splashing amount has been studied by orthogonal design test using 1:6.35 water model for a 50 t top and bottom combined blown converter at Tang steel. Results show that as compared to original 4-hole oxygen lance, with using improved variable angle 4-hole oxygen lance the impact area in bath increases, the penetrating depth and splashing amount decrease while the mixing time decreases. For the 50 t top and bottom combined blown converter the real lance lever ≤ 1.3 m is available to decrease tap to tap time and increase intensity of bath stirring; and the mixing time and splashing amount decrease by controlling top blown rate $13\,000 \sim 14\,000$ m³/h.

Material Index Variable Angle 4-hole Oxygen Lance, Converter, Water Model, Mixing Time, Splashing Amount

目前复合吹炼技术的应用十分广泛,但在实际生产过程中,由于供氧制度不合理也会造成化渣缓慢、脱磷不足、大量金属喷溅的现象^[1-4]。本研究针对唐钢二炼钢 50 t 转炉实际供氧量,在现有 4 孔氧枪的基础上,设计了 4 孔变角(将 4 孔氧枪中相对两喷孔夹角在原有基础上加大 1°)和 5 孔氧枪喷头。在现有冶炼工艺的基础上,利用水力学模型研究了氧枪枪型、顶吹流量、枪位等工艺条件对熔池的混匀时间、穿透深度、喷溅量等参数的影响。

1 实验方法

1.1 实验装置

50 t 转炉有效容积 40.56 m³,熔池深度 1 250 mm,熔池直径 3 178 mm。现有氧枪喷头为 4 孔氧枪,供氧流量 $13\,000 \sim 15\,000$ m³/h,枪位控制在 900 ~ 2 000 mm,吹氧时间约 12 min,底吹供气量 $180 \sim 360$ m³/h。模型炉体、氧枪喷头均按 1:6.35 比例制作(图 1)。

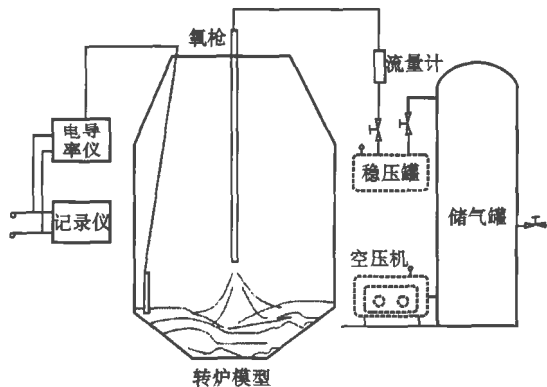


图 1 水模型实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of water model test device

1.2 实验测定方法

各参数的测定方法为^[5]:(1)熔池混匀时间:将一电导电极固定在转炉熔池底部某一位置,实验时向电极相对的另一侧熔池液面加入 30 mL 质量百分比浓度为 8% 的 KCl 溶液,向熔池吹气过程中采用实验室开发数据采集和记录装置对熔池内溶液的

导率进行测定,熔池混匀时间根据电导电极输出的电位差变化达到稳定的时间来确定;(2)穿透深度和冲击面积:气流量稳定后,利用标尺测定穿透深度和冲击凹坑的直径(作为冲击面积);(3)炉口溅出量:利用滤纸进行测量。

1.3 实验参数的确定

水模型实验在保证几何相似的同时,需要保证修正的弗鲁德准数 Fr' 相等,即^[6]:

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

式中: $(Fr')_m$ 、 $(Fr')_o$ 分别为模型和原型的修正弗鲁德准数, $Fr' = \rho u^2 / [(\rho_l - \rho_g)gl]$, 因此:

$$\frac{u_m^2}{gd_m} \times \frac{\rho_{gm}}{(\rho_{lm} - \rho_{gm})} = \frac{u_o^2}{gd_o} \times \frac{\rho_{go}}{(\rho_{lo} - \rho_{go})} \quad (2)$$

由此可得到模型气、液参数与原型气、液参数间的关系:

$$\frac{Q_m}{Q_o} = \left(\frac{d_m}{d_o}\right)^{5/2} \cdot \left(\frac{\rho_{go}}{\rho_{gm}}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\rho_{lm} - \rho_{gm}}{\rho_{lo} - \rho_{go}}\right)^{1/2} \quad (3)$$

式中: Q_m 、 Q_o 分别为模型与原型的气体流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$;

d_m 、 d_o 分别为模型与原型氧枪喉口直径/mm; ρ_{gm} 、 ρ_{go} 分别为模型与原型的气体密度/ $(kg \cdot m^{-3})$; ρ_{lm} 、 ρ_{lo} 分别为模型与原型的液体密度/ $(kg \cdot m^{-3})$ 。

实际生产中,氧枪出口气体流速为超音速,而水力学实验过程中,模型出口气体流速为亚音速,因此在实验过程中对模型喷枪枪位进行了修正^[7],本实验条件下,枪位修正值为 70 mm,即实验选择的枪位为理论计算的模型枪位减去修正值。模型和原型参数对应值如表 1 和表 2 所示。

在唐钢二炼钢现有转炉操作工艺参数的基础上,本实验采用 5 因素 5 水平的正交实验方案,在不考虑各因素交互影响作用的前提下,用 $L_{25}(5^5)$ 正交表安排实验次数,正交实验各因素水平见表 3 所示。

表 1 原型和模型的几何相似参数

Table 1 Geometry similarity parameters of prototype and model

类别	熔池直径/mm	熔池深度/mm	氧枪直径(4孔/4孔变角/5孔)/mm		氧枪枪位/mm
			喉口	出口	
原型	3 178	1 250	26/27/25.5	35.5/35.5/33	900 ~ 1 600
模型	500	197	4.1/4.25/4.0	5.6/5.6/5.2	70 ~ 190

表 2 原型和模型的动力相似参数

Table 2 Dynamic similarity parameters of prototype and model

吹入方式	熔池液体	顶吹气体	顶吹气体密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	底吹气体	底吹气体密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	液体密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	顶枪流量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	底吹流量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)
原型	钢液	氧气	1.43	氮气	1.25	7 000	13 000 ~ 15 000	180 ~ 360
模型	水	空气	1.29	空气	1.29	1 000	40 ~ 80	0.70 ~ 1.41

表 3 正交实验各因素水平

Table 3 Factors and levels in orthogonal design test

因素	水平				
	1	2	3	4	5
枪型	4孔	4孔	4孔变角	4孔变角	5孔
枪位/mm	70	100	130	160	190
熔池深度/mm	157	165	173	181	197
顶吹流量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$	40	42	44	46	48
底吹流量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$	0.70	0.88	1.06	1.23	1.41

表 4 正交实验极差

Table 4 Error limits analysis in orthogonal design test

极差	枪型	枪位/mm	空	熔池深度/m	流量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$	
					顶吹	底吹
混匀时间	10.6	21.4	5.0	6.4	11.0	7.8
穿透深度	37.0	29.4	8.0	8.4	24.4	12.8
冲击面积	21.2	10.4	14	17	34.4	13.6
炉口溅出量	1.066	0.332	0.196	0.166	0.410	0.244

2 实验结果与讨论

由表 4 可见,在实验选择的各实验水平下,对熔池混匀时间影响最为显著的因素为枪位、顶吹流量和枪型,底吹流量和熔池深度对混匀时间的影响较小;对穿透深度影响显著的因素包括枪型、枪位和顶吹流量,而熔池深度和底吹流量对射流的穿透深度影响较小;对冲击面积影响最大的因素为顶吹流量和枪型,而枪位、熔池深度和底吹流量对冲击面积的影响较小;枪型对炉口溅出量影响最大,顶吹流量和枪位次之,底吹流量和熔池深度影响较小。

2.1 熔池混匀时间

由图 2(a)可见,随着枪位增加,熔池混匀时间显著增加,尤其是枪位提高到 130 mm(实际枪位 1.3 m)时,熔池混匀时间急剧增加。由图 2(b)可见,5 孔氧枪向熔池提供的搅拌能最高,熔池混匀时间最短;而 4 孔和 4 孔变角氧枪向熔池提供的搅拌能相差不多,熔池混匀时间均高于 5 孔。由图 2(c)可见,随着顶吹流量的增加,熔池混匀时间显著降低,当顶吹流量提高到 44 m^3/h (实际吹氧量 14 000 m^3/h)以上后,射流向熔池提供的搅拌能变化不大,熔池混匀时间基本稳定。因此为了缩短熔池的混匀

时间,顶吹气体流量最好控制在44 m³/h(实际吹氧量14 000 m³/h)以上。

2.2 熔池穿透深度

由图3(a)可见,各种枪型对熔池穿透深度的影响与对熔池混匀时间的影响紧密相关。其中,5孔氧枪对熔池的穿透深度最深,对熔池搅拌最强,混匀时间也就最短;4孔变角对熔池穿透深度相对较浅,理论上对熔池的搅拌能力影响应当较小,但从对熔池混匀时间的影响来看,4孔变角氧枪对熔池的搅拌能力却很强,这可能是4孔变角氧枪射流进行熔池搅拌的过程中改变了熔池内流体的流动状态。如前所述4孔变角氧枪是在现有4孔氧枪的基础上增加了相对两孔的喷孔倾角,因此相邻两股气体射流对熔池的穿透深度不同,在熔池底部会形成水平环流,从而提高了熔池内溶液的混匀强度,有关这方面的理论分析需要进一步研究证实。因此从实验结果看,尽管4孔变角氧枪射流对熔池的穿透能力不如4孔氧枪,但对熔池的搅拌能力不但没有因穿透深度的降低而减弱,反而有所增强。

由图3(b)可见,枪位越高,射流接触到熔池液面前损失的动能越高,对熔池的冲击越弱,穿透深度越浅。由图3(c)可见,顶吹流量越高,射流动能越大,作用于熔池的作用力越强,穿透深度越深。

2.3 熔池冲击面积

由图4(a)可见,顶吹气体流量越高,氧气射流冲击动能越大,穿透深度增加的同时,冲击面积也相应增加^[8]。由图4(b)可见,5孔氧枪射流冲击动能最大,穿透深度最深,冲击面积最小,这说明5孔氧枪射流的集中度较高,射流能量集中。与4孔相比,4孔变角氧枪增加了相对两喷孔的喷孔倾角,气体射流扩张增强,因此气体射流对熔池的冲击面积增加。

2.4 炉口溅出量

由图5(a)可见,5孔氧枪炉口溅出量最大,其溅出量约为4孔氧枪炉口溅出量的2倍,为4孔变角氧枪炉口溅出量的10倍。5孔氧枪冲击面积最

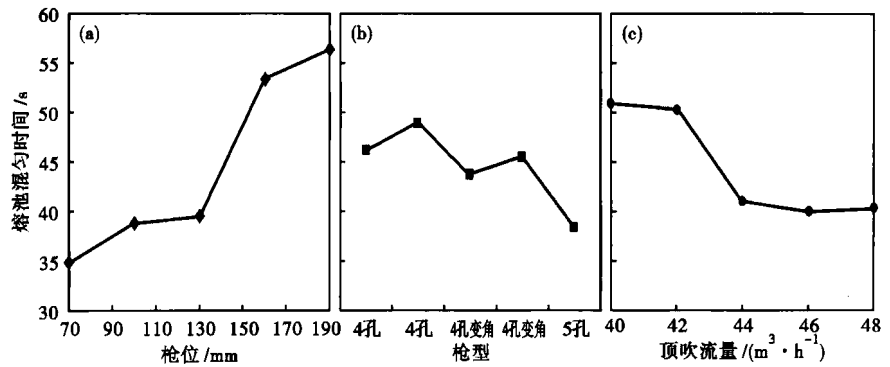


图2 显著因素(a)枪位,(b)枪型和(c)顶吹流量对熔池混匀时间的影响
Fig.2 Effect of prominent factors (a) lance level, (b) nozzle type and (c) top blowing rate on bath mixing time

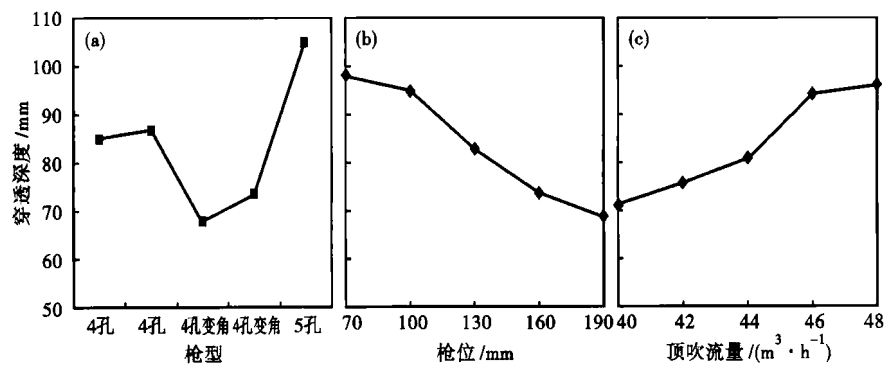


图3 显著因素(a)枪型,(b)枪位和(c)顶吹流量对熔池穿透深度的影响
Fig.3 Effect of prominent factors (a) nozzle type, (b) lance level and (c) top blowing rate on bath penetrating depth

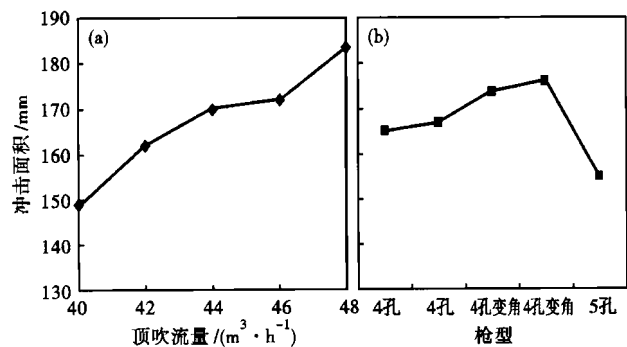


图4 显著因素(a)顶吹流量,(b)枪型对冲击面积的影响
Fig.4 Effect of prominent factors (a) top blowing rate and (b) nozzle type on impact area

小、穿透深度最深,作用于熔池溶液的冲击动能最大,因此从炉口物理溅出的溶液量最高;4孔变角冲击面积最大、穿透深度最浅,作用于熔池溶液的冲击动能最小,液滴获得的动能也就最小,因此从炉口溅出的液体量也就最小。

由图5(b)可见,随顶吹流量增加,炉口溅出量逐渐增加。当顶吹流量低于42 m³/h(实际供气量

13 000 m³/h)时,炉口物理溅出量随顶吹流量的增加并不明显,而顶吹气体流量高于42 m³/h时,炉口物理溅出量随顶吹流量的增加而显著增加。

由图5(c)可见,枪位低于130 mm(实际枪位1.3 m)时,炉口溅出量随枪位的升高而增加,枪位高于130 mm时,炉口溅出量又有所下降,这与枪位对熔池的混匀时间的影响是一致的。

3 结论

(1) 枪位低于130 mm(实际枪位1.3 m),有利于缩短熔池混匀时间;5孔氧枪混匀时间最短,4孔氧枪混匀时间最长,4孔变角氧枪混匀时间居中;从降低熔池混匀时间来看,顶吹气体流量控制在44 m³/h(实际吹氧量14 000 m³/h)较为适宜。

(2) 5孔氧枪穿透深度最深,4孔变角氧枪穿透深度最浅,4孔氧枪穿透深度居中;枪位降低、顶吹流量增加,3种氧枪的穿透深度都明显增加。

(3) 顶吹流量增加,3种氧枪的冲击面积都增加;相同顶吹流量下,4孔变角氧枪冲击面积最大,5孔氧枪冲击面积最小,4孔氧枪冲击面积居中。

(4) 5孔氧枪炉口溅出量最大,为4孔氧枪溅出量的2倍,4孔变角氧枪溅出量的10倍;顶吹流量最好控制在42 m³/h(实际供气量13 000 m³/h);枪位130 mm(实际枪位1.3 m)时,炉口溅出量达到最大值,提升或降低枪位,炉口溅出量都有所降低。

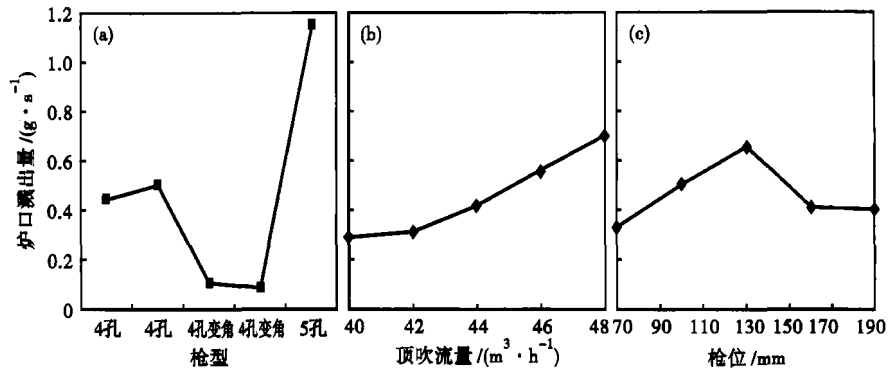


图5 显著因素(a)枪型,(b)顶吹流量和(c)枪位对炉口溅出量的影响
 Fig.5 Effect of prominent factors (a) nozzle type, (b) top blowing rate and (c) lance level on splashing amount

参考文献

- 1 Yuan Zhang-fu, Yang Xiaoyi, Lu Zhixing, et al. Jet Behavior and Metallurgical Performance of Innovated Double-Parameter Oxygen Lance in BOF. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2007, 14 (3):1
- 2 李静,张凤清,顾先强,等.顶吹转炉溅渣护炉工艺冷态模拟实验研究. *冶金能源*, 2001, 20(4):31
- 3 干磊,何平.底吹钢包中钢-渣间传质的物理模型. *钢铁钒钛*, 2008, 29(2):38
- 4 文永才.攀钢转炉溅渣护炉渣系的研究. *钢铁钒钛*, 2002, 23(4):1
- 5 包丽明,刘坤,吕国成,等.转炉氧枪顶吹工艺的水力学模拟. *特殊钢*, 2007, 28(5):13
- 6 刘竹林,高泽平,贺志宏.300 t转炉水力模型实验研究. *特殊钢*, 2007, 28(2):16
- 7 倪红卫,喻淑仁,邱玲慧,等.90 t复吹转炉水模实验研究. *炼钢*, 2002, 18(3):39
- 8 鱼洋洋,唐萍,周亮,等.重钢85 t复吹转炉的水模型试验. *特殊钢*, 2006, 27(2):31

曾亚南(1983-),男,硕士研究生,炼钢新工艺研究。

收稿日期:2009-10-19

“2010年先进钢铁材料国际会议”(International Conference on Advanced Steels 2010, ICAS 2010) 将于2010年11月9~11日在中国桂林召开。ICAS 2010合并了两个国际会议“International Symposium on Ultrafine Grained Structures (ISUGS)”和“International Conference on Advanced Structural Steel (ICASS)”,由中国、日本、韩国、印度共同主办,会议主题涵盖了钢铁冶金、物理冶金、钢种、加工和制造、模拟、性能及应用等领域。

会议主办单位:中国金属学会(CSM)、日本钢铁协会(ISIJ)、韩国金属和材料学会(KIMM)和印度冶金研究院(IIM)。会议组织单位:钢铁研究总院(CISRI)和先进钢铁材料技术国家工程研究中心(NERCAST)。

会议名誉主席:中国工程院徐匡迪院长

会议主席:中国金属学会翁宇庆理事长

我们真诚地欢迎所有感兴趣的人员踊跃投稿和参会,并提出宝贵建议。详情请查询会议网站 <http://www.nercast.com/icas2010>

ICAS 2010 会议秘书处;联系人:刘苏;地址:北京学院南路76号钢铁研究总院结构材料研究所
 邮编:100081 电话:010-62185204 传真:010-62182308 电邮:icas2010@nercast.com