

100 t 钢包底吹氩工艺优化的物理模拟

田恩华 李东侠 崔 衡 闫永其 吴华杰
(北京科技大学冶金工程研究院,北京 100083)

摘要 以钢厂 100 t 钢包为原型,根据相似原理建立1:4水模型,研究了双孔底吹位置(0.54~0.72 R)、角度(45°~180°)和底吹流量(0.04~0.55 m³/h)对混匀时间和钢-渣界面的影响,以确定最佳底吹工艺参数。结果表明,透气砖布置的最优位置为底吹孔距钢包底面中心 0.63 R,180°夹角;最大底吹气量在 0.37 m³/h(原型 18.0 m³/h),软吹气量必须小于 0.12 m³/h(原型小于 6.0 m³/h),建议软吹气量≤0.04 m³/h(原型≤2.0 m³/h)。

关键词 100 t 钢包 底吹氩 混匀时间 物理模拟 卷渣

Physical Modeling for Optimization of Process of Bottom Blowing Argon in a 100 t Ladle

Tian Enhua, Li Dongxia, Cui Heng, Yan Yongqi and Wu Huajie
(Metallurgical Engineering Institute, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract According to the prototype 100 t ladle in steel works and based on similarity theory, a 1:4 water model is established to study the effect of double nozzle bottom blowing position (0.54~0.72 R), angle (45°~180°) and bottom blowing rate (0.04~0.55 m³/h) on mixing time and steel-slag interface and get optimum bottom blowing parameters. Results show that the optimum position of gas permeable brick is bottom nozzle distance from ladle bottom center 0.63 R with angle 180°; the maximum bottom blowing gas rate is 0.37 m³/h (corresponding prototype 18.0 m³/h), the soft blowing rate should be less than 0.12 m³/h (prototype less than 6.0 m³/h) and the suggested soft blowing gas rate is no more than 0.04 m³/h (prototype no more than 2.0 m³/h).

Material Index 100 t Ladle, Bottom Argon Blowing, Mixing Time, Physical Simulation, Slag Entrapment

合理的钢包底吹工艺对钢液去除夹杂物,以及成分和温度均匀等都有良好的效果,但如果底吹工艺不合理,会造成钢液渣面裸露过大,表面覆盖渣卷入钢液内部等污染钢液的情况发生。不同的研究有不同的钢包透气砖的布置位置,特别是双透气砖底吹时,底吹孔喷吹夹角差异较大^[1-6]。

以钢厂 100 t 钢包为原型,研究不同底吹工艺条件对钢包混匀效果和钢-渣界面的影响,以确定适合该钢包的最优底吹工艺。

1 水模型试验

1.1 试验原理

钢包底吹氩工艺中,钢包内钢液流动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,钢-渣界面流动状态主要受到液体表面张力影响。根据相似原理,为保证模型与原型相似,应确保两者的修正弗鲁德准数 Fr' 和韦伯准数 We 相等^[6-8]。同时,由于试验室是采用压缩空气来代替氩气,所以还必须经过换算才能得出试验用气量。

$$\text{修正弗鲁德准数: } Fr' = \frac{\rho_g u^2}{gH(\rho_l - \rho_g)} \quad (1)$$

式中: u - 特征速度; H - 熔池深度; l - 液相; g - 气相。

$$\text{特征速度可以表示为: } u = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (2)$$

式中: Q - 气体体积流量; d - 底吹喷嘴直径。

$$\text{将式(2)代入式(1)得: } Fr' = \frac{1.621 \rho_g Q^2}{gH(\rho_l - \rho_g) d^4} \quad (3)$$

因为 $Fr'_m = Fr'_p$, 有:

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \sqrt{\frac{\rho_{g,p} \rho_{l,m} - \rho_{g,m} \rho_{l,p}}{\rho_{g,m} \rho_{l,p} - \rho_{g,p} \rho_{l,m}}} \left(\frac{d_m}{d_p}\right)^4 \frac{H_m}{H_p} \quad (4)$$

式中: m - 模型; p - 原型。

由韦伯准数 $We_m = We_p$, 有:

$$\frac{\rho_{l,m} u_m^2}{(\rho_{l,m} - \rho_0)^{1/2} g \sigma_{w-o}} = \frac{\rho_{l,p} u_p^2}{(\rho_{l,p} - \rho_{sl})^{1/2} g \sigma_{st-sl}} \quad (5)$$

式中: σ_{w-o} , σ_{st-sl} - 水-油以及钢-渣界面张力; ρ_0 , ρ_{sl} - 油和熔渣密度。

本试验选用 $\lambda = 1:4$ 的试验模型,用水模拟钢液,压缩空气模拟氩气,油模拟钢渣,经过转子流量计校正,得:

$$Q_m = 0.020\ 414\ Q_p \quad (6)$$

$$\rho_0 = 857.328\ \text{kg/m}^3 \quad (7)$$

真空泵油密度约为 $880\ \text{kg/m}^3$,且 $20\ ^\circ\text{C}$ 真空泵油的运动粘度 ($199 \times 10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$) 在 $1\ 600\ ^\circ\text{C}$ 钢包渣的运动粘度为 $28.6 \times 10^{-6} \sim 229 \times 10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$ ^[9],所以试验使用真空泵油模拟钢渣。

1.2 试验装置及方法

考虑电极圆对钢包底吹孔位置的影响,试验底吹孔的布置如图 1(a) 所示,为双孔吹气,底吹孔位置为 $0.54\ R, 0.63\ R$ 和 $0.72\ R$,底吹孔角度为 $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 和 180° 。在试验开始前,将一支电极安放在原型取样口对应位置液面下 $5\ \text{cm}$,另一支电极安放在钢包底部水口上方 $5\ \text{cm}$ 处。向模型钢包内注入一定高度的水,通过转子流量计控制底吹气量,使底吹气量达到目标值,恒定 $3\ \text{min}$,使气柱处于垂直状态,以保证钢包流体流动达到稳定态。从混匀时间这个指标出发,通过“刺激-响应”的技术来测定。

试验时,将 $100\ \text{mL}$ 饱和 KCl 溶液加至钢包投料口对应位置水面,同时使电导率仪和电脑采集数据系统开始工作,用安放在不同位置的电导电极记录数据。为了更好的消除试验误差,试验每个测量点,重复测量 $2 \sim 3$ 个试验数据,取试验数据的平均值作为该测量点的试验结果。试验装置如图 1(b) 所示。原型和模型底吹气量对比见表 1。

2 试验结果分析

2.1 原型位置试验分析

原型钢包有两个透气砖,原型底吹孔均位于距钢包底中心 $0.63\ R$ 处,两孔成 180° 夹角,即为图 1(a) 中 2[#] 和 5[#],现场每个透气砖的吹气量为 $24\ \text{m}^3/\text{h}$ 。试验结果显示,原型底吹工艺条件下钢包模型的混匀时间为 $52.8\ \text{s}$ 。试验过程中同时观察到,原型底吹工艺条件下液面波动大,极易造成卷渣,且氩气流量过大会增加生产成本。

图 2 给出了原型底吹位置条件下混匀时间与底吹气量的关系。随着底吹气量的增加,混匀时间呈现先降低后又有所增加的趋势,在底吹气量为 $0.37\ \text{m}^3/\text{h}$ 时达到最小值 $45.2\ \text{s}$,与原型底吹气量 $0.49\ \text{m}^3/\text{h}$ 相比较,混匀时间降低了 14.4% 。说明底吹气量并不是越大越好,应有一合适的范围使得混匀时间最小。因此,在现有底吹位置的条件下,适当减小底吹气量,既可减少混匀时间,加快生产节奏,又可以减少氩气消耗量,降低生产成本。

2.2 底吹位置的优化

由图 3 可以看出,各组试验钢包混匀时间均随着底吹气量的增大而减少。对各角度下的结果进行比较,得出了各角度下的较优方案: 45° 夹角时为 2[#]

表 1 原型和模型底吹气量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
Table 1 Flow rate of prototype and model / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

原型	模型
2.0	0.04
3.0	0.06
6.0	0.12
9.0	0.18
12.0	0.24
15.0	0.31
18.0	0.37
21.0	0.43
24.0	0.49
27.0	0.55

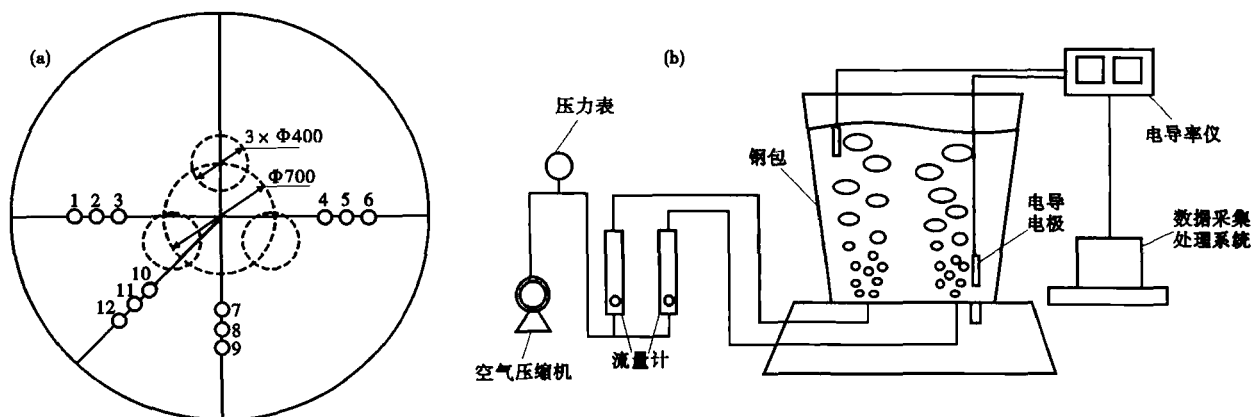


图 1 模型钢包底吹孔位置(a)和试验装置(b)示意图

Fig. 1 Schematics of position of model ladle bottom blowing nozzles (a) and experimental device (b)

和 11[#] (0.63 R), 90° 夹角时为 3[#] 和 7[#] (0.54 R), 135° 夹角时为 5[#] 和 11[#] (0.63 R), 180° 夹角时为 1[#] 和 6[#] (0.72 R)。

由图 4 可以看出,大角度(135°和 180°)的混匀效果优于小角度(45°和 90°)的混匀效果,试验混匀时间最大差距可达到 30 s 左右。5[#]和 11[#](0.63 R、135°)的试验结果优于原型条件,在小气量底吹时,5[#]和 11[#](0.63 R、135°)比原型混匀时间减少了 11.1 s,在中等气量底吹时的混匀时间比原型减少了 9.8 s,在大气量底吹时的混匀时间比原型减少了 1.8 s。1[#]和 6[#](0.72 R、180°)的试验结果也优于原型条件,在小气量底吹时,1[#]和 6[#](0.72 R、180°)比原型混匀时间减少了 1.6 s,在中等气量底吹时的混

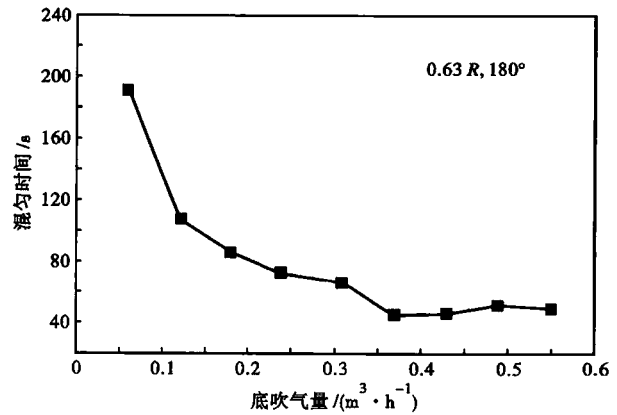


图 2 原型钢包水模型(0.63 R, 180°)底吹气量对混匀时间的影响

Fig. 2 Effect of bottom blowing gas rate of prototype ladle water model (0.63 R, 180°) on mixing time

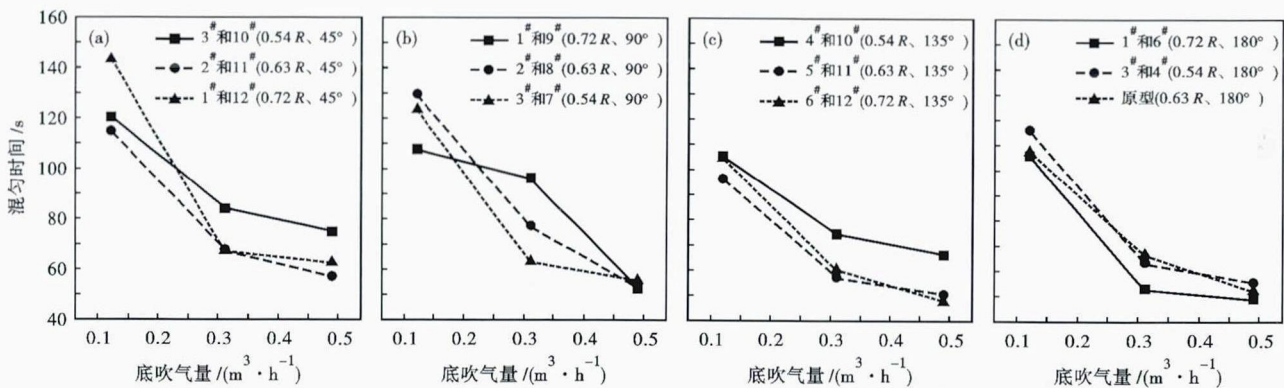


图 3 双孔底吹位置与底吹气量对混匀时间的影响:(a)45°;(b)90°;(c)135°;(d)180°

Fig. 3 Effect of double nozzle position and bottom gas blowing rate on mixing time: (a) 45°; (b) 90°; (c) 135° and (d) 180°

匀时间比原型减少了 13.9 s,在大气量底吹时的混匀时间比原型减少了 3.5 s。

2.3 底吹气量的优化

通过底吹位置优化试验,得出了混匀效果较好的底吹位置为 1[#]和 6[#](0.72 R、180°)、5[#]和 11[#](0.63 R、135°)。

由图 5 可以看出,5[#]和 11[#](0.63 R、135°)进行底吹时,当底吹气量小于 0.37 m³/h 时,随着底吹气量的增加,混匀时间逐渐减小;当底吹气量大于 0.37 m³/h 时,混匀时间出现波动,且在 0.37 m³/h 时有最小混匀时间 46.0 s。在 1[#]和 6[#](0.72 R、180°)进行底吹时,当底吹气量小于 0.31 m³/h 时,随着底吹气量的增大,混匀时间逐渐减小;在 0.31 ~ 0.37 m³/h 趋于平稳;在大于 0.37 m³/h 时,混匀时间出现波动,出现最小混匀时间 49.3 s,但此刻液面波动较大,更易造成卷渣。因此,此位置优化的底吹气量应为 0.31 ~ 0.37 m³/h。对 3 个不同位置不同底吹气

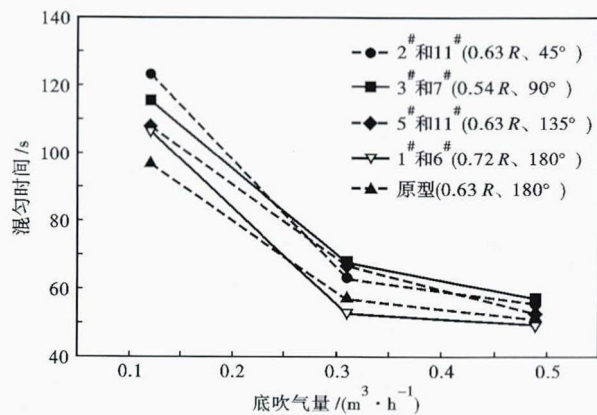


图 4 各双孔角度较优方案的混匀时间比较

Fig. 4 Comparison of mixing time of each better double nozzle scheme

量的混匀时间进行对比,在模型底吹气量小于 0.37 m³/h 时,5[#]和 11[#](0.63 R、135°)位置处的混匀效果较好,当模型吹气量在 0.37 ~ 0.49 m³/h 时,原型位置的混匀效果较好。

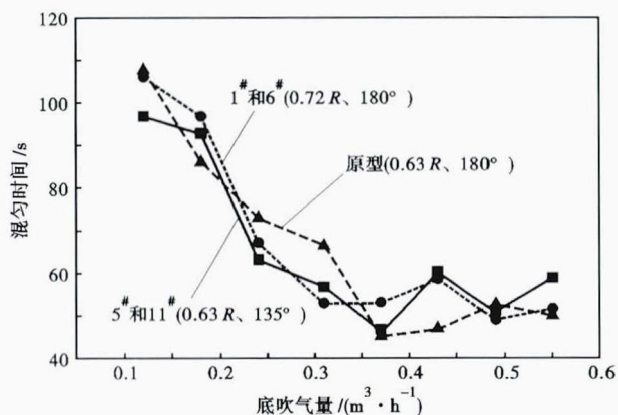


图 5 各优化方案底吹气量对混匀时间的影响

Fig. 5 Effect of bottom blowing gas rate of each optimum scheme on mixing time

由图 5 还可以看出,在低底吹气量下,随底吹气量增加,混匀时间下降幅度大,而在较高底吹气量下,混匀时间随底吹气量增加下降的幅度降低,当底吹气量大于 $0.37 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,各位置混匀时间有所增加,气泡贯穿运行能主要消耗在吹开渣面和液面翻滚。因此,各位置底吹气量不应超过 $0.37 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

2.4 钢-渣界面模拟试验

试验用真空泵油模拟钢渣,对渣面裸露情况和钢-渣界面的卷混现象进行了观察。试验发现,渣面的裸露面积随吹气量的增加而增加。当底吹气量为 $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,渣面出现稳定渣眼,考虑空气二次氧化影响,建议软吹气量小于 $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$;当底吹气量为 $0.12 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,出现水-油界面不稳、有油滴卷入水中的现象。因此,软吹气量必须小于 $0.12 \text{ m}^3/\text{h}$ 。当底吹气量大于 $0.37 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,“渣眼”面积增大趋势逐渐变缓,底吹气量增大产生的能量并不主要消耗在对钢液的搅拌,气泡的溢出和钢液翻滚带走大部分能量。

试验过程还通过记录油层的附壁现象对包壁冲刷现象进行了观察。试验发现,在相同的底吹气量条件下,由于原型位置两个吹气孔相对距离包壁较远,因此,原型位置 ($0.63 R, 180^\circ$) 的油层附壁现象最轻,油层沿包壁冲入水中的深度最大为 89 mm ,而 1# 和 6# ($0.72 R, 180^\circ$) 由于相对距离包壁最近,附壁现象最严重,油层沿包壁冲入水中的深度最大为 136 mm ,5# 和 11# ($0.63 R, 135^\circ$) 处油层沿包壁冲入水中的深度介于两者之间,为 105 mm 。

2.5 最优底吹工艺的确定

综合考虑混匀时间试验、钢-渣界面试验以及对包壁的冲刷,选定最优底吹位置为原型位置(即 2#

和 5#),底吹孔距钢包底面中心 $0.63 R$,夹角 180° ;底吹气量最大控制在 $0.37 \text{ m}^3/\text{h}$,软吹气量必须小于 $0.12 \text{ m}^3/\text{h}$,建议软吹气量小于 $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

3 结论

(1) 最优底吹位置为原型透气砖布置位置,底吹孔距钢包底面中心 $0.63 R$,夹角为 180° 。

(2) 大角度 (135° 和 180°) 布置的底吹孔的混匀效果优于小角度 (45° 和 90°) 布置的底吹孔的混匀效果,试验混匀时间最大差距可达到 30 s 左右。

(3) 当底吹气量大于 $0.37 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,各位置混匀时间有所增加,且钢-渣界面“渣眼”面积变化趋势逐渐变缓,因此,最大底吹气量控制在 $0.37 \text{ m}^3/\text{h}$ (原型 $18.0 \text{ m}^3/\text{h}$)。

(4) 当底吹气量为 $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,渣面出现稳定渣眼,考虑空气二次氧化影响,建议软吹气量小于 $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ (原型 $< 2.0 \text{ m}^3/\text{h}$);当底吹气量为 $0.12 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,出现水-油界面不稳、有油滴卷入水中的现象,因此,软吹气量必须小于 $0.12 \text{ m}^3/\text{h}$ (原型 $< 6.0 \text{ m}^3/\text{h}$)。

中央高校基本科研业务费专项资金 (FRF-TP-12-143A); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20100006120005)

参考文献

- [1] 温德松,李京社,谢翠红,等. 150 t 钢包精炼过程的物理模拟[J]. 北京科技大学学报,2007,29(Suppl 1):101-104.
- [2] 辛伟,倪红卫,沈巧珍,等. 130 t 钢包底吹喷嘴布置模式优化的水模型试验[J]. 特殊钢,2007,28(4):13-15.
- [3] 钟晓丹, E. 楠,邹宗树,等. LF 双孔底吹优化布置的水模型研究[J]. 材料与冶金学报,2006,5(2):101-104.
- [4] 丁宇,包燕平,孙齐松,等. 90 t 钢包炉底吹氩工艺优化的水模拟试验研究[J]. 特殊钢,2010,31(5):8-10.
- [5] Zhu M Y, Inomot T, Sawada I, et al. Fluid Flow Phenomena in the Ladle Stirred by Argon Through Multi-tuyere[J]. ISIJ International, 1995,35(5):472-479.
- [6] 钟良才,李壮,梁锋,等. 120 t 精炼钢包底吹氩物理模拟[J]. 过程工程学报,2010,10(Suppl 1):103-107.
- [7] Jeong W H, Seung H H, Dong H K, et al. Transient Fluid Flow Phenomena in a Gas Stirred Liquid Bath with Top Oil Layer-Approach by Numerical Simulation and Water Model Experiments[J]. ISIJ International, 2001,41(10):1165-1173.
- [8] 朱苗勇,肖泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟[M]. 北京:冶金工业出版社,1998.
- [9] SH/T 0528-1992. 矿物油型真空泵油[S]. 中华人民共和国石油化工行业标准,1992.

田恩华(1989-),男,硕士研究生(北京科技大学),北京科技大学(本科)毕业,洁净钢生产技术。

E-mail: tianenhua@hotmail.com.

收稿日期:2013-07-19