

120 t 复吹转炉底枪布置优化

张岭^{1,2}, 于波³, 钟良才^{1,2*}, 王立新³, 贺龙龙^{1,2}, 翁莉³, 李强^{1,2}

(1. 东北大学多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 3. 建龙集团抚顺新钢铁炼钢厂, 辽宁 抚顺 113001)

摘要:以 120 t 顶底复吹转炉为原型, 依据相似原理在实验室利用几何相似比为 1:10 的模型开展了物理模拟试验, 研究了氧枪枪位、底枪支数和布置、供气流量等因素对转炉熔池搅拌混匀的影响; 建立了转炉纯底吹气液两相流模型, 研究了不同底枪方案对熔池速度场的影响。结果表明: 底吹流量为 0.534 m³/h 和 1.074 m³/h 的纯底吹时, 4~8 支底枪的最佳布置方案的混匀时间平均值分别为 28.50、28.25 s 和 27.50 s; 复吹时, 对于 8 支底枪的最佳布置方案, 顶吹流量为 122 m³/h, 不同氧枪枪位下熔池混匀时间随底吹流量的增大而降低, 最佳枪位在 200~230 mm。通过数学模拟研究了物理模拟试验得到的最佳 4、6、8 支底枪布置方案的速度场, 发现底吹时水平截面流场的涡心个数少, 垂直截面流场涡心不对称程度大时, 可降低“死区”体积, 从而提高底吹气体的搅拌能力, 使熔池的混匀时间降低。底吹流量为 1.074 m³/h 时, 研究的 4、6、8 支最佳底枪布置方案的死区体积比分别为 15.44%、23.56% 和 10.30%。

关键词:转炉; 顶底复吹; 熔池; 搅拌混匀; 流体流动; 物理模拟; 数学模拟

中图分类号: TF713.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)05-0136-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.05.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Bottom tuyere configuration optimization in 120 t combination blown converter

Zhang Ling^{1,2}, Yu Bo³, Zhong Liangcai^{1,2*}, Wang Lixin³, He Longlong^{1,2}, Weng Li³, Li Qiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ecological Metallurgy of Multi-metal Symbiosis Ore, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 3. Jianlong Fushun New Iron and Steel Plant, Fushun 113001, Liaoning, China)

Abstract: Physical experiment in a model with a geometric similarity ratio of 1:10 for a 120 t top-bottom combined blown converter based on the similarity theory was conducted in laboratory. The effect of bottom gas flowrate, number and arrangement of bottom tuyeres on the bath mixing was studied. A mathematical model of gas-liquid two-phase flow in the converter at single bottom blowing was established in the simulation. The effect of bottom tuyere configurations on velocity field in molten bath was studied. The results showed that the average mixing time with the optimized configurations of 4, 6 and 8 bottom tuyeres at bottom gas flow rate of 0.534 m³/h and 1.074 m³/h is 28.50, 28.25 s and 27.50 s in the case of single bottom blowing. In the case of combined blowing, the mixing time in the molten bath decreases with increase in bottom gas flow rates with the optimized configuration of 8 bottom tuyeres at

收稿日期: 2022-05-09

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金资助(N2125018); 国家自然科学基金项目(51574069); 科技部国家重点研发计划资助项目(2017YFB0304100)。

作者简介: 钟良才, 1958 年出生, 男, 广西钟山人, 博士, 教授, 通讯作者, 研究方向: 转炉炼钢, E-mail: zhonglc@mail.neu.edu.cn。

top gas flow rate of 122 m³/h under different top lance heights. The velocity fields in the bath with the optimized configurations of 4, 6 and 8 bottom tuyeres were investigated in the mathematical simulation. It is found that less vortex centers of flow fields on horizontal sections and large asymmetry of vortex centers of flow fields on vertical sections can decrease “dead zone” volumes, which can improve the stirring ability of bottom gas and reduce mixing time in molten bath. The “dead zone” volumes in molten bath from the optimized configurations of 4, 6 and 8 bottom tuyeres studied here are 15.44%, 23.56% and 10.30%, respectively.

Key words: converter, top and bottom blow, bath, stirring and mixing, fluid flow, physical modeling, mathematical simulation

0 引言

目前顶底复吹转炉炼钢是我国主要的炼钢方法, 它结合了顶吹和底吹转炉冶炼的优点, 利用顶吹氧气和底吹搅拌气体对转炉熔池进行搅拌, 以改善渣金间反应动力学条件, 提高转炉脱磷脱碳效果, 达到吹炼平稳、缩短冶炼时间、降低终渣全铁含量、提高钢水质量的目的。在复吹转炉炼钢过程中, 顶吹气体流量、底吹气体流量和氧枪枪位对熔池搅拌混匀有很大的影响。国内外众多学者对复吹转炉底枪布置的数量和位置采用不同的方式^[1-4]。Ajmani^[5]等人利用水模试验研究了 130 t 复吹转炉熔池的混匀和传质速率, 结果显示, 复吹转炉熔池混匀时间随底枪支数增加而降低。Klaus Koch^[6]等人通过冷态模拟试验, 研究了复吹转炉底吹气体流量对熔池搅拌混匀的影响。研究发现, 随着底吹流量的增加, 熔池混匀时间降低。谢植等人^[7]通过水模型物理模拟试验研究了底枪对称和非对称布置对复吹转炉熔池混匀时间的影响。研究结果表明, 采用非对称底枪集中布置的转炉熔池搅拌效果好, 混匀时间短。但以上研究仅限于较少的底枪数量和布置方案, 并且未建立转炉熔池流体流动的数学模型, 不能描述转炉中的具体流动现象。

笔者以 120 t 复吹转炉为研究对象, 运用物理模拟研究了底枪支数、布置和供气强度、顶枪枪位等因素对复吹转炉熔池混匀时间的影响, 运用数值模拟研究了底枪支数和布置对熔池内流场和速度场的影响, 为实际复吹转炉的底枪布置提供了依据。

1 研究方法

1.1 物理模拟试验方法

由于实际转炉熔池流动过程复杂, 在缩小的冷态物理模拟试验中不能保证所有的相似准数都相等, 因此本研究采用近似模拟的方法, 近似模型法只保证主要的相似准数相等。在模拟过程中要找到模型与原型之间起决定性作用的相似准数, 并根据相似准数计算试验模型的各项物理参数。

本研究在建立复吹转炉物理模型时主要考虑了原型与模型之间的几何相似和动力相似, 用水代替钢液, 用压缩空气代替转炉顶吹和底吹气体来进行物理模拟试验。在保证几何相似的条件下保证原型与模型转炉的修正弗鲁德准数相等进行试验, 以保证原型与模型的流体流动相似^[8-10]。按照几何相似比 1 : 10 建立 120 t 复吹转炉物理试验模型, 原型转炉和模型转炉的主要参数如表 1 所示。

表 1 原型转炉与模型转炉的主要参数
Table 1 Main parameters of prototype converter and model converter

	熔池直径/mm	熔池深度/mm	氧枪喷头孔数/孔	氧枪喷头喷嘴夹角/(°)	顶吹气体流量/(m ³ ·h ⁻¹)	底吹气体流量/(m ³ ·h ⁻¹)
原型	5 380	1 410	5	15	37 200	465/930/1 395/1860
模型	538	141	5	15	122	0.216/0.534/1.074/1.608/2.142

模拟试验装置如图 1 所示, 试验装置主要由复吹转炉模型、供气系统和混匀时间测定系统组成。供气系统由空压机将压缩空气送入储气罐, 分别经

过气体减压阀、转子流量计、顶枪和底枪吹入转炉熔池中。熔池的混匀时间由混匀时间测定系统进行测定, 首先对熔池吹气搅拌 90 s, 以保证熔池内形成

稳定流场。通过漏斗向熔池内加入 40 mL 浓度为 0.2 g/mL 氯化钾溶液作为示踪剂,并开始计时,用 3 支固定在熔池底部不同位置的电导电极测量熔池中水溶液电导率的变化,并经数据采集仪输入计算机,最后由计算机测量软件判定,当监测点示踪剂浓度低于其混匀浓度的 $\pm 3\%$ 时的时间作为每支电极位置处浓度的混匀时间,取 3 支电极混匀时间的最大值作为熔池的混匀时间。每组条件的试验重复 3 次以上,由重复试验得出的混匀时间的平均值作为该试验条件的混匀时间。

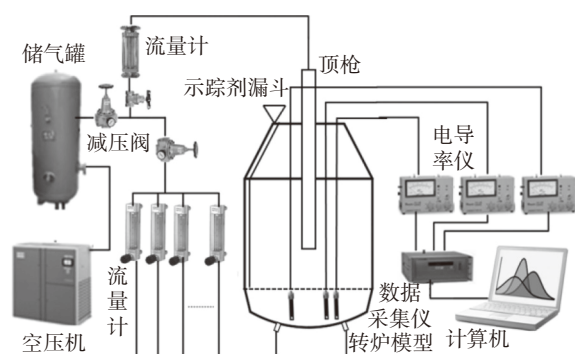


图1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

图2为转炉模型底枪开孔位置和标号。模型转炉底部径向上存在由内到外4个圆周,依次标记为圆A、B、C、D。每个圆上均匀分布有14个底吹供气元件且按顺时针方向标记为1~14。

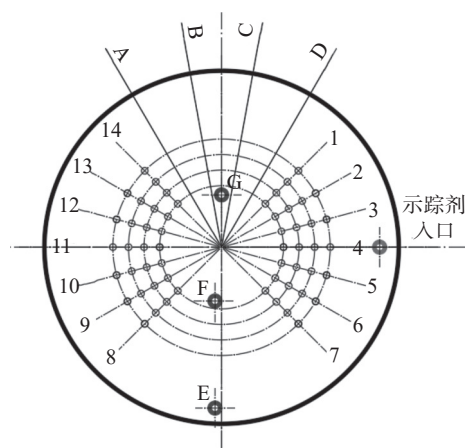


图2 模型转炉底枪开孔位置及编号

Fig. 2 Position and numeration of bottom tuyeres in the model converter

熔池混匀时间是判断熔池搅拌效果的重要参数,在物理模拟试验中,依次研究4、6、8支底枪不同布置方式对熔池搅拌混匀的影响。研究的4、6、8支底枪的不同布置方案如表2~4所示。

表2 4支底枪布置方案

Table 2 Arrangements of 4 bottom tuyeres

布置方案	底枪编号	布置方案	底枪编号
4-1	B(2-5-10-13)	4-9	B(5-12)-C(3-10)
4-2	B(3-6-9-12)	4-10	C(5-12)-D(3-10)
4-3	A(5-12)-B(3-10)	4-11	A(6-13)-B(4-11)
4-4	A(5-13)-B(2-10)	4-12	B(6-13)-C(4-11)
4-5	A(6-14)-B(4-10)	4-13	A(4-11)-B(2-9)
4-6	A(5-13)-B(3-9)	4-14	B(4-11)-C(2-9)
4-7	B(3-6-10-13)	4-15	B(3-5-10-12)
4-8	B(2-6-10-12)		

表3 6支底枪布置方案

Table 3 Arrangements of 6 bottom tuyeres

布置方案	底枪编号	布置方案	底枪编号
6-1	A(5-12)-B(3-10)-C(4-11)	6-9	A(5-12)-B(3-10)-C(1-8)
6-2	A(5-12)-B(3-10)-D(4-11)	6-10	A(5-12)-B(2-9)-C(4-11)
6-3	A(5-12)-B(3-10)-C(6-13)	6-11	A(5-12)-B(3-9)-C(4-11)
6-4	A(5-12)-B(3-10)-D(6-13)	6-12	A(5-12)-B(2-10)-C(4-11)
6-5	A(5-12)-B(3-10)-C(7-14)	6-13	A(5-13)-B(3-10)-C(4-11)
6-6	A(5-12)-B(3-6-10-13)	6-14	A(6-12)-B(3-10)-C(4-11)
6-7	A(5-12)-B(3-10)-C(2-9)	6-15	A(5-12)-B(2-6-9-13)
6-8	A(5-12)-B(3-10)-D(2-9)	6-16	A(6-13)-B(3-10)-C(4-11)

表4 8支底枪布置方案

Table 4 Arrangements of 8 bottom tuyeres

布置方案	底枪编号	布置方案	底枪编号
8-1	A(6-12)-B(3-10)-C(4-6-11-13)	8-15	A(5-12)-B(2-10)-C(4-6-8-11)
8-2	A(6-12)-B(3-10)-C(4-7-11-13)	8-16	A(5-12)-B(2-10)-C(1-4-8-11)
8-3	A(6-12)-B(3-10)-C(4-6-11-14)	8-17	A(5-12)-B(3-6-10-13)-C(4-11)
8-4	A(6-12)-B(3-10-14)-C(4-6-11)	8-18	A(5-12)-B(3-6-10-13)-C(4-12)
8-5	A(6-12)-B(3-10)-C(2-4-9-11)	8-19	A(5-12)-B(3-6-10-13)-C(5-11)
8-6	A(6-12)-B(3-10)-C(1-4-9-11)	8-20	A(5-12)-B(3-6-10-13)-C(5-12)
8-7	A(6-12)-B(3-10)-C(2-4-8-11)	8-21	A(5-12)-B(1-3-6-8-10-13)
8-8	A(6-12)-B(3-8-10)-C(2-4-11)	8-22	A(5-12)-B(3-6-10-13)-C(2-9)
8-9	A(5-12)-B(2-10)-C(4-6-11-13)	8-23	A(5-12)-B(3-6-10-13)-C(1-9)
8-10	A(5-12)-B(2-10)-C(4-7-11-13)	8-24	A(5-12)-B(3-6-10-13)-C(2-8)
8-11	A(5-12)-B(2-10)-C(4-6-11-14)	8-25	A(5-12)-B(3-6-10-13)-C(1-8)
8-12	A(5-12)-B(2-10-13)-C(4-6-11)	8-26	A(1-5-8-12)-B(3-6-10-13)
8-13	A(5-12)-B(2-6-10)-C(4-11-13)	8-27	A(5-12)-B(3-6-10-13)-D(4-11)
8-14	A(5-12)-B(2-10)-C(4-6-9-11)	8-28	A(5-12)-B(3-6-10-13)-C(7-14)

1.2 数学模拟研究方法

本研究使用 SolidWorks 软件绘制模型转炉熔池的三维模型, 利用 Ansys 前处理软件 Fluent Meshing 进行网格划分, 网格总数为 44 300 个, 转炉模型计算区域及网格划分如图 3 所示。

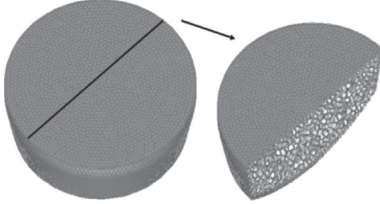


图 3 熔池计算区域和网格划分

Fig. 3 Computational zone and meshing in the molten bath

由于钢液在复吹转炉熔池中的流动过程复杂, 并伴随有化学反应、传热、传质过程, 为了便于研究熔池内的流体流动, 对熔池内液体和气体提出以下假设: ①炉内流体为常物性; ②不考虑熔池内化学反应; ③忽略渣层对熔池流动的影响; ④忽略气泡间的作用力, 气泡为刚性。

1) 熔池气液两相流模型控制方程

用 VOF 模型来追踪熔池气体与液体相互作用的气液界面形状, 对于第 q 相的流动, 需满足质量守恒定律, 连续性方程为:

$$\frac{\partial \alpha_q \rho_q}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_q \rho_q u_q)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中, α_q 是 q 相的体积分率, 且 $\sum \alpha_q = 1$; ρ_q 是第 q 相的密度, kg/m^3 ; u_q 是第 q 相的速度, m/s 。

气液两相流流动的动量方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \\ & - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g + F \end{aligned} \quad (2)$$

式中, x_i 分别代表 x 、 y 、 z 方向坐标, m ; u_i 和 u_j 分别为流体在 i 和 j 方向上的速度分量, m/s 。 ρ 为两相流体的密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; p 为流体的压力, Pa ; μ_{eff} 为有效粘度且 $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; F 为相间作用力, N/m^3 , 本研究主要包括气泡曳力、虚拟质量力、压力梯度力。

两相流动量方程里的密度 ρ 和粘度 μ 用以下两式计算:

$$\rho = \rho_g \alpha_g + \rho_l \alpha_l \quad (3)$$

$$\mu = \mu_g \alpha_g + \mu_l \alpha_l \quad (4)$$

式中, 下标 g 代表气相, 下标 l 代表液相。

采用标准 k - ε 双方程模型来计算顶底复吹转炉熔池内的气液两相流的湍流流动。 k - ε 双方程模型表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (k\rho) + \frac{\partial}{\partial x_j} (k\rho u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + p_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon \rho u_j) = \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (c_1 p_k + c_2 \rho \varepsilon) \end{aligned} \quad (6)$$

其中:

$$p_k = \mu_t u (\nabla u + \nabla u^T) \quad (7)$$

由 k 和 ε 的值可以确定 $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$ 。 k - ε 湍流模型中的常数取值为经验常数, 目前普遍采用经验值为 $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

采用 DPM 模型来模拟底吹气泡在转炉熔池的运动, 只考虑主要的力对气泡流动的影响。底吹气泡运动方程:

$$\begin{aligned} & \frac{du_p}{dt} = F_D (u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \\ & \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (u - u_p) + \frac{\rho}{\rho_p} u_p \nabla u \end{aligned} \quad (8)$$

式中, 等号右边第一项是曳力; 第二项为净浮力; 第三项是虚拟质量力; 第四项是压力梯度力; u 为连续相速度; u_p 为气泡速度; ρ 为连续相密度; ρ_p 为气泡气体密度; F_D 为曳力系数。

在模拟过程中通过求解传质方程得到熔池中示踪剂浓度随时间的变化, 确定熔池形成稳定流场的混匀时间, 进而对纯底吹时气液两相流模型的准确性进行验证。传质方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{eff} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

式中, C 为示踪剂的质量分率; D_{eff} 为示踪剂的有效扩散系数。

本研究中, 顶底复吹转炉熔池上部设置为压力出口, 出口处气体体积分数设置为 1, 只允许气体通过。转炉壁面选择为无滑移壁面, 在与液体相接触的壁面处, 速度分量选用无滑移边界条件, 相应法向分量为 0, 对壁面附近的区域选用壁面函数处理。使用 UDF 来控制气泡近液面的破碎进入气相。利用 Ansys Fluent 软件进行数值模拟求解, 使用压力基准器和瞬态计算, 压力插值使用 PRESTO! 离散格式, 连续性方程、动量方程对流项、湍动能和湍流耗

散率的离散格式使用二阶迎风格式,当各个变量的无量纲残差小于 1.0×10^{-4} 时认为数值计算收敛,之后将计算结果使用 Tecplot 软件进行后处理,以获得熔池流体流动的速度场。

2) 数学模拟的底枪布置方案

在对 120 t 复吹转炉不同底枪支数布置进行物理模拟优化后,此处主要对如图 4 所示的混匀时间较短的底枪布置方案 4-3、方案 6-6 和方案 8-18 进行数值模拟计算,进一步研究底枪支数和布置对熔池流动的影响。

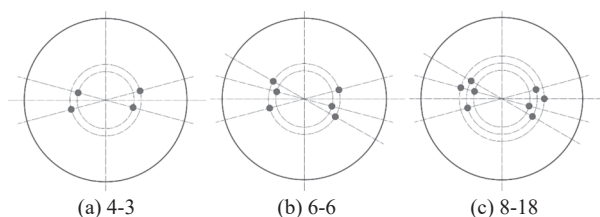


图 4 数学模拟的底枪布置方案

Fig. 4 Bottom tuyere configurations in mathematical simulation

2 结果与讨论

2.1 物理模拟结果与讨论

纯底吹条件下,4 支底枪布置在底吹流量为 $0.216 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,熔池混匀时间在 $40.3 \sim 70.5 \text{ s}$,其中大部分布置方案的混匀时间在 45 s 以上,只有方案 4-1、4-3 和 4-11 的混匀时间小于 45 s 。底吹流量为 $0.534 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,混匀时间在 $25.7 \sim 50.3 \text{ s}$,大部分布置方案的混匀时间在 $30 \sim 40 \text{ s}$ 。当底吹流量达到 $1.074 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,熔池混匀时间在 $24.9 \sim 43.5 \text{ s}$,其中方案 4-3、4-7、4-12 的混匀时间在 25 s 左右。方案 4-5 和 4-10 的搅拌效果较差,混匀时间均在 40 s 以上。由以上试验可知,在炉底布置 4 支底枪的 15 种试验方案中,熔池搅拌效果较好的方案 4-3、4-7、4-12,但方案 4-7 和 4-12 在低的底吹气量下的混匀时间比方案 4-3 的长。这三种方案的底枪是布置在 A、B 和 C 的圆周上,且同一侧两支底枪的位置相对集中。

纯底吹条件下,6 支底枪布置方案在底吹流量为 $0.216 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,不同布置方案的混匀时间在 $42.7 \sim 61.9 \text{ s}$,布置方案 6-5 和 6-6 的混匀时间在 45 s 之内。底吹流量增加至 $0.534 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,混匀时间在 $28.8 \sim 45.6 \text{ s}$,其中方案 6-6 熔池搅拌效果最好为 28.8 s 。继续增加底吹流量到 $1.074 \text{ m}^3/\text{h}$,熔池混匀时间为 $24.3 \sim 37.8 \text{ s}$,大部分布置方案的混匀时间

在 $25 \sim 35 \text{ s}$,其中方案 6-14 的混匀时间低于 25 s ,方案 6-2、6-8 和 6-16 的混匀时间比较长,分别为 37.8 、 35.2 、 35.5 s 。底吹气体流量达到 $1.608 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,混匀时间为 $21.3 \sim 33.8 \text{ s}$ 。综合来看,底枪布置方案 6-6 的熔池搅拌效果最好,该布置方案是在方案 4-3 的基础上,在圆周 B 上增加 6[#]和 13[#]孔得到的。

纯底吹条件下,8 支底枪布置方案在底吹流量为 $0.534 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,不同布置方案的熔池混匀时间在 $30.6 \sim 46.3 \text{ s}$,其中方案 8-18 的混匀时间最低。底吹流量增加至 $1.074 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,混匀时间在 $23.6 \sim 34.9 \text{ s}$ 。底吹气体流量达到 $1.608 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,熔池混匀时间在 $17.8 \sim 28.6 \text{ s}$,8-17、8-28 两种布置方案的混匀时间小于 20 s 。综合对比可以得出,在 8 支底枪布置方案 8-18、8-28 两种布置方案底吹搅拌能力较强,平均熔池混匀时间为 25 s 左右,而方案 8-18 在低的底吹气量下,能够获得最低的混匀时间,且其他两个底吹气量下的混匀时间也较低。实际上,底枪布置方案 8-18 是在最佳的 6 支底枪布置方案 6-6 的基础上,在圆周 C 上增加 4[#]和 12[#]底枪得到的。

纯底吹时,最佳底枪布置方案 4-3、6-6 和 8-18 在 0.534 和 $1.074 \text{ m}^3/\text{h}$ 两个底吹流量下计算的平均混匀时间分别为 28.50 、 28.25 、 27.50 s 。

图 5 为顶吹流量为 $122 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,底枪布置方案 8-18 在不同氧枪高度下的熔池混匀时间。由图 5 可知,顶吹流量一定,不同氧枪高度下熔池混匀时间均随底吹流量的增大而降低。底吹流量为 $0.534 \sim 1.074 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,除枪位 170 mm ,熔池混匀时间随枪位的提高而增大;底吹流量为 $1.608 \sim 2.142 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,混匀时间随枪位的提高呈现先降低后逐渐稳定的趋势。这是由于低枪位时,顶吹气体到达熔池的时间较短,气体之间相互干扰能力较小,使得顶吹气体到达熔池液面时衰减较小,虽然顶吹气体的冲击动能大但作用范围小,不能对熔池进行大范围的搅拌。随着枪位的提高,氧枪喷头与熔池液面距离增加,熔池的冲击面积增大,顶吹气体可以对更大范围的液体进行搅拌,使熔池混匀时间逐渐降低。当枪位继续升高超过一个临界值时,造成顶吹气体到达熔池的动能不断衰减,不利于熔池搅拌,使得熔池混匀时间增加。

对比方案 8-18 在复吹和纯底吹条件下的混匀时间发现,枪位在 $170 \sim 260 \text{ mm}$ 变化的复吹转炉熔池混匀时间始终大于纯底吹的混匀时间。这是因

为熔池的搅拌能主要来自于底吹气体,加入顶吹气体后,顶吹气体射流与底吹气体流动冲突导致能量耗散,使底吹气体吹入熔池产生的动能减少,熔池搅拌能减少,混匀时间增加。

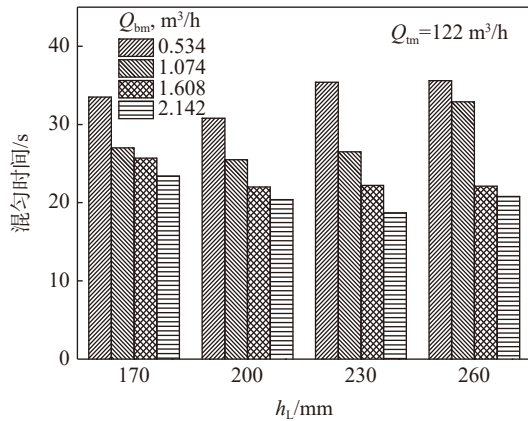


图5 底枪布置方案8-18在顶吹流量为122 m³/h时不同氧枪高度的混匀时间

Fig. 5 Mixing time in molten bath with different oxygen lance heights at top gas flow rate of 122 m³/h for case 8-18

2.2 数学模拟结果与讨论

为验证纯底吹气液两相流模型的准确性,利用组分传输模型计算不同底枪布置方案的熔池混匀时间,数学模型示踪剂浓度监测点与物理模拟中电极位置相同,两者示踪剂投入点相同,均以示踪剂浓度不再超出混匀平衡浓度的±3%时的时间作为监测点的混匀时间,取三点混匀时间的最大值作为熔池的混匀时间,结果如图6~7所示。由图6和图7可知,不同底枪布置方案物理模拟试验测得的混匀时间和数学模拟计算出的混匀时间相差1.8~3.5 s,不同底枪支数和布置的混匀时间变化趋势相同,表明数学模型得到的结果与物理模拟的结果相近。

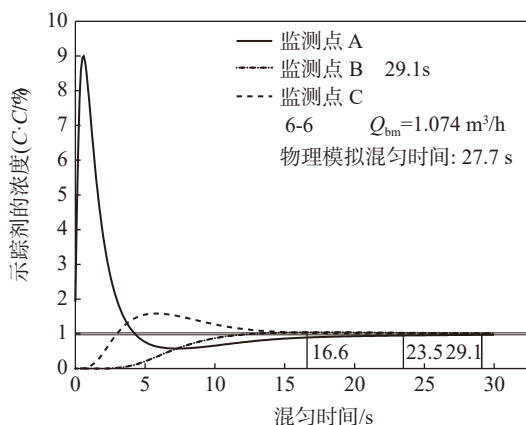


图6 底枪布置方案6-6数值模拟混匀时间

Fig. 6 Mixing time in mathematical simulation with case 6-6

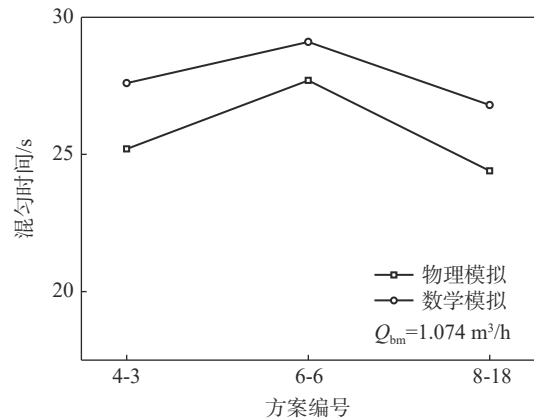


图7 不同底枪布置方案物理模拟与数值模拟混匀时间对比

Fig. 7 Comparison of mixing time between physical and mathematical simulations in different bottom tuyere configurations

2.3 底枪支数和布置对熔池流场的影响

从物理模拟结果可知,熔池的搅拌效果对底枪布置和底吹强度有很高的依赖性。通过转炉纯底吹气液两相流数学模拟,研究不同底吹方案对熔池流场的影响。

图8是底吹流量为1.074 m³/h时,底枪布置方案4-3、6-6和8-18在熔池不同高度水平截面上的速度云图和流线图。由图8可知,在熔池中不同高度的水平截面上,气泡群上升的浮力带动周围液体运动形成多个大小不一的环流区域,当气泡群上升到熔池液面后,将液体向四周排开使之相对运动,进而对熔池进行搅拌。在1/3液面高度上,只有熔池中部和边缘存在少量速度小于0.015 m/s的低速区;2/3液面高度上,布置方案6-6的熔池四周存在面积较大的低速区域,方案4-3和8-18熔池边缘存在少量低速区,流体在此高度下形成围绕上升底吹气泡流中心的环流的流动状态。从2/3液面高度的截面上环流的涡心数看,方案4-3、6-6和8-18的涡心数分别为4、6和5个,每个涡心形成以各自涡心为中心的环流区,涡心多,则环流区就多,就不利于整个熔池的混匀,如方案6-6在涡心之间存在面积较大的低速区,其熔池混匀时间比其它两个布置方案要长。

不同底枪布置方案下沿耳轴截面的熔池速度场如图9所示。底吹气体进入熔池后形成气泡向上运动,带动周围液体在竖直方向上做循环流动,可以在气泡群的两侧形成两个明显涡心。

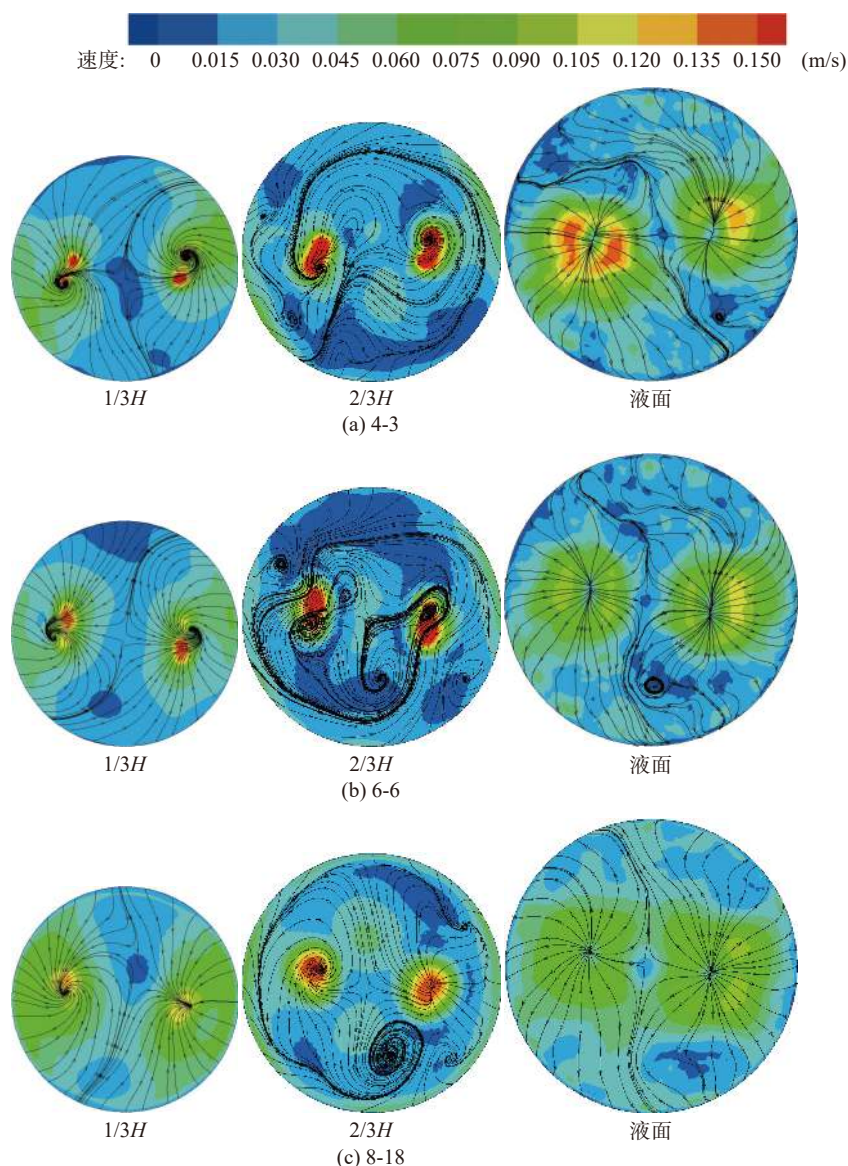


图 8 不同布置方案熔池水平截面的流体流动

Fig. 8 Streamlines of different bottom tuyere configurations on different horizontal section in the molten bath

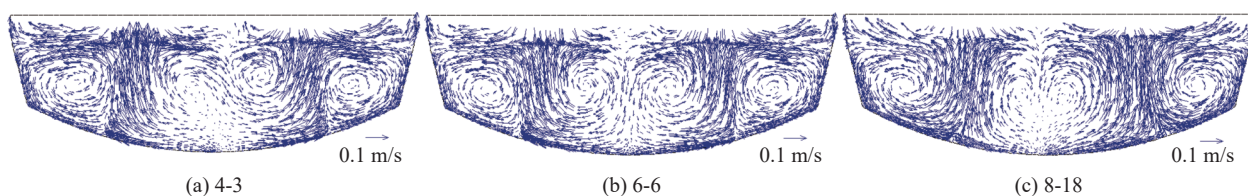


图 9 不同布置方案耳轴截面的速度矢量

Fig. 9 Velocity fields of different bottom tuyeres configurations at trunnion section

在此截面上底枪布置方案 6-6 在耳轴截面上形成右边三个涡心高度相差不大但高于最左侧的涡心的流场; 方案 4-3 形成的流场的左右两个相邻的涡心中, 右侧涡心明显高于左侧涡心, 而且两个内侧涡心高度不对称, 存在从左侧涡心向右侧涡心的流动,

导致液体能够穿过熔池中心到达熔池右侧, 有利于整个熔池的传质; 底枪布置方案 8-18 形成两个外侧涡心高于两个内侧涡心非对称流场, 使涡流在竖直方向上可以搅动更广泛的区域, 有利于熔池均匀。

图 10 是不同底枪布置方案垂直耳轴的截面速

度云图。由于垂直耳轴截面上没有底枪布置, 底吹气体对该截面流场的作用大小能够更好地反映底枪布置对熔池搅拌的影响。由图 10 可知, 方案 4-3 形成了两个涡心, 熔池左侧的涡心周围和离该涡心较远处存在面积较大的低于 0.015 m/s 的区域, 该涡心的上部区域速度稍大。方案 6-6 左右两侧存在两个涡心, 在这两个涡心附近和熔池底部存在面积更大

的低速区, 而且速度在 0.015 ~ 0.030 m/s 的面积较大, 表明底吹气体对该截面的搅拌能力较弱。方案 8-18 形成的流场只有一个涡心, 而熔池底部和中心部分速度较大, 熔池底部右侧和中心的小部分区域速度较小, 说明该底枪布置方案的底吹气体对该截面的搅拌效果好。

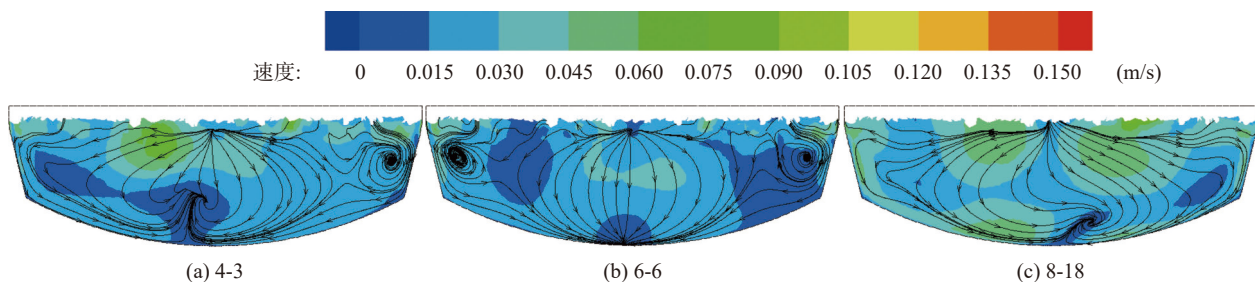


图 10 不同布置方案垂直耳轴截面速度云图

Fig. 10 Velocity contours vertical to trunnion direction with different bottom tuyere configurations

尽管底吹在熔池搅拌过程起着关键性作用, 但熔池中仍旧存在一些流体流动速度较小的区域, 把速度小于 0.015 m/s 的区域定义为“死区”, 图 11 为底吹流量为 1.074 m³/h 时, 方案 4-3、6-6、8-18 的“死区”形状三维俯视图, 水平方向为垂直于耳轴方向, 可见: 方案 6-6 “死区”体积最大为 23.56%, 主要聚集在熔池前后大面附近的区域, 并带有两条带状“死区”生成, 这些低速区的存在阻碍了熔池内部的对流传质; 底枪布置方案 8-18 的熔池“死区”体积明显减少, “死区”体积比为 10.3%, 主要集中在前后大面附近; 方案 4-3 “死区”体积比为 15.44%, 熔

池中的“死区”主要位于一侧大面, 熔池下部存在一些块状“死区”, 无条状“死区”。

综上, 纯底吹条件下, 底吹气体流量小于 1.074 m³/h 时, 可采用较少的底枪; 底吹气体流量大于 1.074 m³/h 时, 采用较多的底枪, 在最佳底枪布置方案下有利于降低熔池的混匀时间。复吹条件下, 当底吹流量为 0.534 ~ 1.074 m³/h 时, 最佳的顶吹枪位为 200 mm; 当底吹流量为 1.608 ~ 2.142 m³/h 时, 最佳的顶吹枪位为 200 ~ 230 mm。

下一步将建立复吹转炉的数学模型, 研究不同顶枪枪位、供气流量对熔池流体流动的影响。

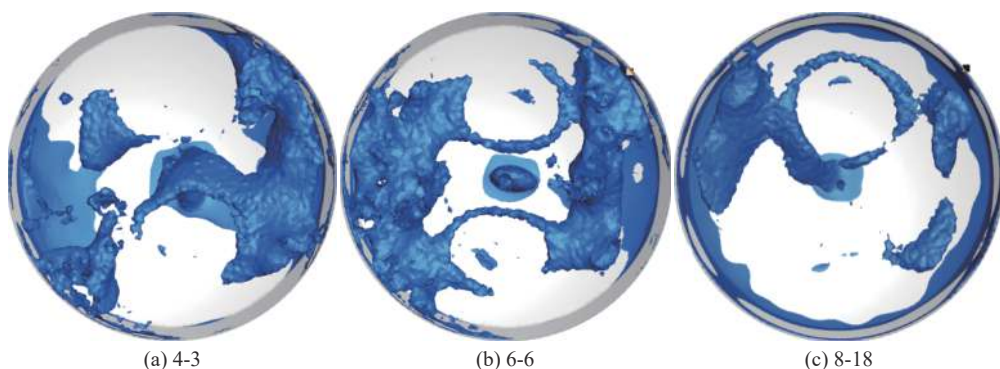


图 11 底吹流量为 1.074 m³/h 不同布置方案熔池死区

Fig. 11 Dead zone in the molten bath with different bottom tuyere arrangements with bottom gas rate of 1.074 m³/h

3 结论

1) 物理模拟试验纯底吹时, 最佳底枪布置方案

4-3、6-6 和 8-18 在底吹流量为 0.534 和 1.074 m³/h 下的平均混匀时间分别为 28.50、28.25、27.50 s。

2) 底枪布置方案 8-18 在顶吹流量为 122 m³/h,

底吹流量为 $0.534 \sim 1.074 \text{ m}^3/\text{h}$ 复吹时, 熔池混匀时间随氧枪枪位的提高而增大; 底吹流量为 $1.608 \sim 2.142 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 熔池混匀时间随氧枪枪位的提高呈现先降低后逐渐稳定的趋势, 最佳枪位范围为 $200 \sim 230 \text{ mm}$ 。

3) 底吹时得到的水平截面流场的涡心个数少, 有利于熔池流体流动时形成较少的环流区, 在垂直截面流场上的涡心不对称, 有利于形成不对称的流动, 可降低“死区”体积, 从而提高底吹气体的搅拌能力, 使熔池的混匀时间降低。底吹流量为 $1.074 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 底枪布置方案 6-6 的水平截面的涡心

最多, 垂直截面流场的涡心不对称程度低, 死区体积最大, 达到 23.56%; 而底枪布置方案 4-3、8-18 的熔池水平截面流场的涡心较少, 垂直截面流场涡心不对称程度高, 熔池中“死区”体积较小, “死区”体积比分别为 15.44% 和 10.30%。

致谢

本研究得到了中央高校基本科研业务专项资金资助(N2125018)、科技部国家重点研发计划资助项目(2017YFB0304100)和国家自然科学基金项目(51574069)资助, 在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] Yan Guangting, Tang Ping, Zhang Shuyun. Influence of bottom blowing oxygen and bottom tuyeres configuration on mixing characteristics of converter bath[J]. *Sichuan Metallurgy*, 1990, (1): 45–61.
(颜广庭, 唐萍, 张淑筠. 底吹氧量及底枪配置对复吹转炉熔池混合特性的影响[J]. *四川冶金*, 1990, (1): 45–61.)
- [2] Yang Wenyuan, Ding Yongliang, Wang Minglin, *et al.* Water modeling of interaction between jets from multi-nozzle lance and bath in large converter[J]. *Iron and Steel*, 2004, 39(3): 16–19.
(杨文远, 丁永良, 王明林, 等. 大型转炉多孔喷头射流与熔池作用的水模研究[J]. *钢铁*, 2004, 39(3): 16–19.)
- [3] Ni Hongwei, Yu Shuren, Qiu Linghui, *et al.* Cold model study on 90 t top-bottom combined blown converter[J]. *Steelmaking*, 2002, 18(3): 39–43.
(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.)
- [4] Abdul Quiyoom, Ravi Golani, Vikas Singh, *et al.* Effect of differential flow schemes on gas-liquid flow and liquid phase mixing in a basic oxygen furnace[J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 170(10): 777–789.
- [5] Ajmani, Chatterjee. Cold model studies of mixing and mass transfer in steelmaking vessels[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2005, 32(6): 515–527.
- [6] Stišović T, Koch K. Bottom blowing investigations on a cold model reactor to optimise mixing behaviour in metallurgical processes[J]. *Steel Research*, 2002, 73(9): 373–377.
- [7] Lai Z Y, Xie Z, Zhong L C. Influence of bottom tuyere configuration on bath stirring in a top and bottom combined blown converter[J]. *ISIJ International*, 2008, 48(6): 793–798.
- [8] Zhong Lingcai, Zhou Xiaobin, Zhu Yingxiong, *et al.* Bath mixing behavior in a 100 t top-bottom-side blown converter[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2011, 10(4): 241–243.
(钟良才, 周小宾, 朱英雄, 等. 100 t顶底侧吹转炉熔池混匀行为[J]. *材料与冶金学报*, 2011, 10(4): 241–243.)
- [9] Yang Chen. Optimization of hydraulic model for 120 t on top bottom combined blown converter [D]. Anshang: University of Science and Technology Liaoning, 2016.
(杨晨. 120 t顶底复吹转炉水力学模型优化研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2016.)
- [10] Chen Min. Cold model study 210 t top-bottom combined blown converter [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2011.
(陈敏. 210 t顶底复吹转炉水模型实验研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2011.)

编辑 杨冬梅