

100 t 顶底复吹转炉底吹透气砖分布对钢液流场影响的数值模拟

宁林新 解家英 张利君 王凤琴
(首钢技术研究院, 北京 100043)

摘 要 利用 Fluent 流体软件, 研究钢厂 100 t 顶底复吹转炉底吹透气砖数量(1~4)和分布对钢液流场及混匀时间的影响。结果表明, 底吹砖数量和布置不同时, 熔池的流动形成及搅拌效果也不相同; 在气体总流量(100 m³/h)相同的情况下, 单透气砖钢液混匀时间最长, 为 380 s; 两块底吹砖非对称对角分布时, 钢液的混匀时间最短, 为 204 s; 其次为 4 块底吹砖平面对称分布结构, 混匀时间为 255 s。

关键词 100 t 复吹转炉 底吹透气砖分布 数值模拟 钢液流场 混匀时间

Numerical Simulation for Effect of 100 t Top-Bottom Combined Blown Converter Bottom Blown Porous Bricks Distribution on Flow Field of Liquid

Ning Linxin, Xie Jiaying, Zhang Lijun and Wang Fengqin
(Shougang Technology Institute, Beijing 100043)

Abstract The effect of number (1~4) and distribution of bottom blown porous bricks of 100 t top-bottom combined blown converter at steel works on flow field of liquid and mixing time has been studied by using Fluent software for fluid. Results show that with different number and configuration of bottom blown porous bricks the flow conditions and stirring results are different. With gross bottom gas flow rate 100 m³/h, the liquid mixing time of liquid with single porous brick is longest, i. e. 380 s, the mixing time of liquid with double porous bricks located asymmetrically on the cross at furnace bottom is shortest that is 204 s, while the flowing configuration is planar-symmetrical distribution of 4 bottom porous bricks with liquid mixing time 255 s.

Material Index 100 t Top-Bottom Combined Blown Converter, Distribution of Bottom Blowing Porous Bricks, Numerical Simulation, Flow Field of Liquid, Mixing Time

目前, 顶底复吹转炉钢的产量占整个转炉钢产量的大部分, 在国内外获得了很大的发展^[1-3]。顶底复合吹炼由于增加了底部供气, 加强了熔池的搅拌力, 则使熔池内成分和温度的不均匀性得到有效改善, 碳氧反应更进一步接近平衡, 避免了钢水的过氧化, 提高了转炉脱磷、脱硫的能力和终点残锰的质量分数, 提高了钢水及合金收得率。转炉复合吹炼技术发展至今, 底吹喷嘴的供气性能与寿命仍然是关键问题。现在的研究较多地集中在底吹喷嘴的材质和结构方面, 而对于底吹喷嘴位置排布对钢液流动的影响研究尚少见报导。

本文针对钢厂 100 t 复吹脱碳转炉底吹透气砖分布对钢液流动的影响进行了仿真模拟, 该转炉采用多孔定向式转炉底吹透气砖, 该种底吹供气模式用于脱碳转炉, 具有控制底吹供气强度范围较大的特点, 并研究了不同透气砖分布对钢液流场及混匀时间的影响, 从而为转炉底吹工艺参数设计提供理论支持。

1 模型的建立

1.1 几何模型

100 t 转炉的计算物理模型见图 1 所示, 由于只研究底吹的影响, 因此模型只建了下半部分。其中图 1(b)为转炉炉底吹透气砖的俯视分布图。计算中使用的钢液和氩气物性参数见表 1。

1.2 数学模型

转炉底吹气是一个复杂的气液两相流过程, 钢

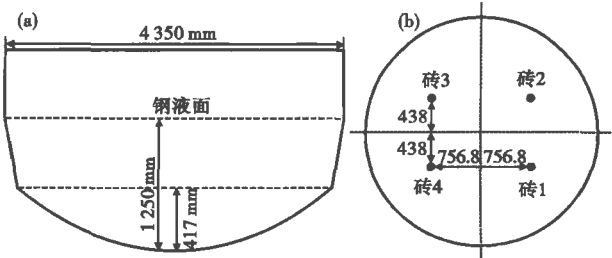


图 1 100 t 转炉底吹透气砖布置的物理模型
Fig. 1 Physical model of layout of bottom blowing porous bricks in 100 t converter

表 1 钢液和氩气的物性参数表

Table 1 Physical parameters of liquid and argon gas

钢液密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	钢液粘度/ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	Ar 密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Ar 粘度/ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	Ar 气泡直径/ mm
7 020	0.005	1.622 8	2.125×10^{-5}	1

液在气泡柱浮力的带动下在转炉内做循环运动,起到了搅拌钢液的作用。采用 FLUENT 中的欧拉多相流模型和计算湍流 $k-\varepsilon$ 模型计算转炉内的钢液流动,具体计算模型中所用到的控制方程见文献[4-5]。

1.3 边界条件

(1)在转炉底吹入口采用氩气质量流量入口条件,氩气从透气砖进入钢液,氩气的体积分数为 1。

(2)出口压力为转炉上部压力,压力 0.101 MPa,计算中认为只有气体会产生回流。

(3)转炉壁面采用无滑移边界条件,近壁面处采用标准壁面函数处理。

1.4 混匀时间的计算方法

1.4.1 确定监测点位置

在靠近转炉底部($z=0.45\text{ m}$)和靠近钢液表面($z=1.2\text{ m}$)取两个水平截面,在靠近壁面的 4 个位置各取一个监测点,如图 2 所示。示踪剂投入位置为转炉中心钢液表面位置。

1.4.2 混匀时间计算

底吹转炉钢液流场计算稳定后,从转炉中心投入一定量的示踪剂,示踪剂的物性参数与钢液一致,跟踪监测点的示踪剂浓度随时间的变化曲线。计算不同时刻 8 个监测点的标准偏差,当标准偏差 $< 10^{-5}$ 时,认为该时刻为钢液的混匀时间,同时也能得到标准偏差随时间的变化曲线。由于混匀时间大小受标准偏差设定值、监测点位置的影响,因此计算结果只作为不同吹气位置时混匀效果的定性比较。

标准偏差的计算公式如下:

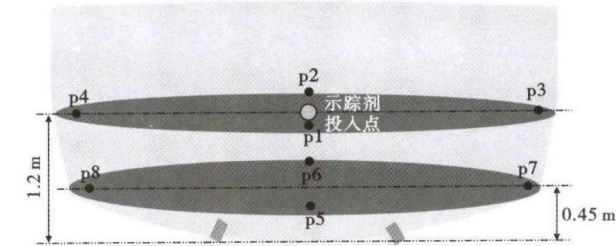
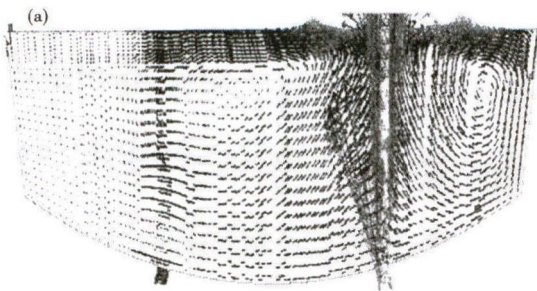


图 2 监测点位置图

Fig. 2 Schematics of monitoring site

表 2 4 种工况炉底吹气砖打开方式和钢液混匀时间
Table 2 4 kinds of configuration of bottom blowing porous bricks opening mode and mixing time of liquid

工况	打开的吹气砖	单透气砖吹气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	混匀时间/ s
1	砖 1	100	380
2	砖 1 和砖 3	50	204
3	砖 1 和砖 2	50	273
4	砖 1,2,3,4	25	255

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + L + x_n}{n}, \delta = \sqrt{\frac{n \sum \bar{x}^2 - (\sum \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

式中: x_1, x_2, x_n - 各个监测点的浓度; n - 监测点的个数; δ - 标准偏差; $\bar{x}$ - 浓度的平均值。

2 计算结果及讨论

根据钢厂转炉的特点及生产工艺的需求,本文分别计算 4 种炉底吹气方式下钢液流动及钢液混匀时间的变化。计算工况如表 2。

2.1 单透气砖底吹气时转炉内的钢液流场及浓度场计算(工况 1)

2.1.1 单透气砖底吹转炉内流场特征

图 3 为钢液在转炉内的流动形态,其中图 3(a)为速度矢量图,图 3(b)为流线图。从图 3 中可看出,底吹气体从透气砖喷出后在熔池内向上运动并沿流股的径向扩展,且在气体上浮过程中带动周围

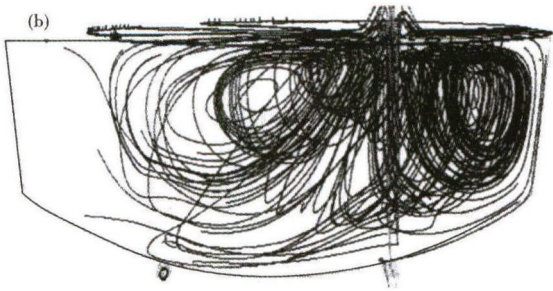


图 3 单透气砖底吹转炉内钢液速度分布(a)和流线图(b)

Fig. 3 Distribution pattern of speed (a) and flowing line (b) of liquid in converter with single bottom porous brick

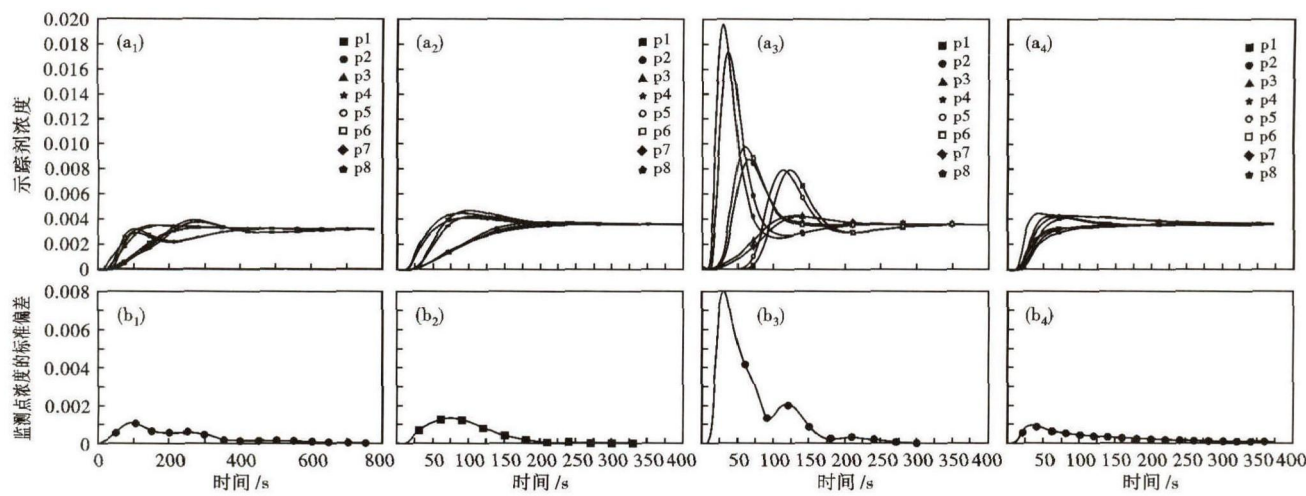


图 4 监测点浓度(a₁,a₂,a₃,a₄)和标准偏差(b₁,b₂,b₃,b₄)随时间变化曲线:(a₁)(b₁)工况 1;(a₂)(b₂)工况 2;(a₃)(b₃)工况 3;(a₄)(b₄)工况 4

Fig.4 Curves of tracer concentration at monitoring site (a₁, a₂, a₃, a₄) and standard deviation (b₁, b₂, b₃, b₄) changing with time: (a₁) (b₁) configuration 1; (a₂) (b₂) configuration 2; (a₃) (b₃) configuration 3; and (a₄) (b₄) configuration 4

的钢液流动,越靠近气流中心钢液流速越大。在靠近气流轴线附近钢液随流股由下向上运动;随着距轴线中心距离的增加,流体逐渐改为由上向下运动。即气体运动到自由液面后,钢液的运动方向发生改变,在气流柱两侧形成了两个回流,起到了均匀钢液成分和温度的作用。从速度场看出,气流柱附近的钢液速度最大,自由液面的钢液速度次之,回流部分的钢液速度最小。

2.1.2 单透气转炉底吹混匀时间计算

图 4(a₁)为 8 个监测点示踪剂浓度随时间的变化曲线,图 4(b₁)为监测点标准偏差随时间的变化曲线。从图 4(a₁)可以看出,由于不同监测点距透气砖位置不同,示踪剂浓度的变化曲线也不相同;但随着吹气时间的增加,8 个监测点的示踪剂浓度最终都趋于混匀的平均浓度。从图 4(b₁)可看出,随着监测点的浓度趋于一致,标准偏差趋于 0。以标准偏差 $<10^{-5}$ 为计算混匀时间的标准,得出单透气砖底吹时混匀时间为 380 s。

2.2 双透气砖底吹气时转炉内的钢液流场及浓度场计算(工况 2、3)

2.2.1 双透气砖底吹转炉内流场特征

图 5~图 6 为 2 种不同双透气砖底吹位置时转炉内钢液的流场,从图 5、6 中看出,双透气砖底吹位置不同时,转炉内钢液流动形态也不相同。如图 5 所示,当双透气砖底吹位置为对角时,在过透气砖位置的纵截面上,透气砖附近的钢液被气体带着向上流动,运动至自由液面后向气柱的内侧流动,在透

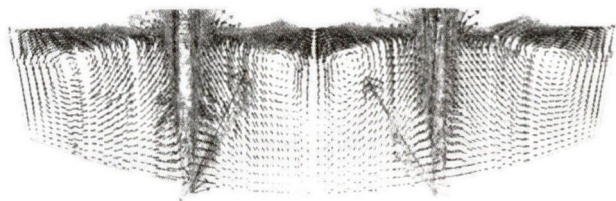


图 5 过透气砖 1、3 纵截面上速度分布(工况 2)

Fig.5 Distribution of speed of liquid at longitudinal section through porous brick 1 and 3, configuration 2

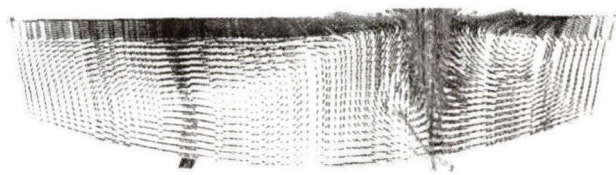


图 6 过透气砖 1 纵截面速度分布(工况 3)

Fig.6 Distribution of speed of liquid at longitudinal section through porous brick 1, configuration 3

气砖附近各形成两个循环,纵截面上共形成 4 个循环流动。图 6 为双透气砖底吹位于同一侧时的流场图,从图 6 可看出,在纵截面上形成两个循环流,流动趋势与单透气砖底吹时相似,但受双透气砖吹气的影响,钢液流动速度较单透气砖吹气大,这直接影响到混匀效果。

2.2.2 双透气砖转炉底吹时混匀时间的计算

图 4(a₂,a₃)为两种双透气砖底吹位置下,8 个监测点浓度随时间的变化曲线。从图 4(a₂,a₃)中可看出,由于吹气位置的不同,同一监测点的示踪剂浓度变化曲线也不相同,转炉内钢液成分达到混匀

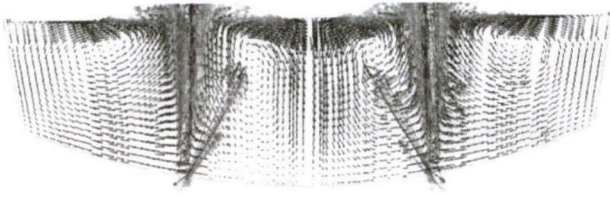


图 7 4 块透气底吹砖时转炉内钢液速度分布(工况 4)
Fig. 7 Distribution of speed of liquid in converter with 4 bottom porous bricks, configuration 4

的时间也不相同。图 4(b_2, b_3) 显示监测点浓度的标准偏差随着吹气时间的增加逐渐趋于 0。在相同的吹气量下,吹气位置为对角布置时,混匀效果最佳,混匀时间为 204 s(表 2)。其次为工况 3,即吹气位置为同一侧,透气砖距转炉中心的距离为 438 mm 时,混匀时间为 273 s。

2.3 4 块透气砖底吹气时转炉内的钢液流场及浓度场计算(工况 4)

2.3.1 4 块透气砖底吹转炉内流场特征

图 7 为 4 块透气砖底吹截面的流场图,从图 7 中看出,当 4 块透气砖同时吹气时,钢液随着气体向上运动到自由液面,后沿着自由液面水平流动至转炉侧壁,沿侧壁向下回流到透气砖附近,在每个透气砖两侧都形成了循环流动。从流动分布来看,除转炉底部两个透气砖之间的速度较小,可能存在死区之外,其他区域的速度分布较均匀。

2.3.2 4 块透气砖底吹转炉内流场特征

图 4(a_4) 为示踪剂浓度随时间的变化曲线,图 4(b_4) 为监测点标准偏差随时间的变化曲线。从图 4(a_4) 可看出,不同监测点的示踪剂浓度随着吹气时间的增加最终趋于一个平均值,取 8 个监测点的标准偏差,如图 4(b_4) 所示,标准偏差随吹气时间增加逐渐趋于 0,当监测点浓度的标准偏差 $< 10^{-4}$ 时,认为转炉内的示踪剂已经完全混匀,混匀时间为 255 s。

3 结论

(1) 100 t 转炉底吹结构不同时,钢液的流动形态也不相同,但共同的特征是钢液随气体向上运动并沿流股的径向扩展;当气体运动到自由液面后,钢液的运动方向发生变化,在气柱两侧形成了两个循环流动,起到了均匀钢液成分和温度的作用。

(2) 单透气砖底吹流量为 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,通过监测点浓度随时间的变化曲线,得出混匀时间为 380 s。采用双透气砖底吹(每个透气砖的流量为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$) 时,混匀效果优于单透气砖底吹;且双透气砖底吹最佳的位置为对角线分布,混匀时间为 204 s;非对角底吹时混匀时间为 273 s。采用 4 块透气砖底吹(每个透气砖流量为 $25 \text{ m}^3/\text{h}$) 时,转炉内钢液除底部两透气砖之间区域外,其他区域流场速度分布较均匀,混匀时间为 255 s。

(3) 对于钢厂 100 t 复吹脱碳转炉,建议采用双透气砖对角底吹结构,可有效降低钢液的混匀时间。

参考文献

- [1] 崔健,杨文远. 宝钢 300 t 转炉溅渣护炉工艺研究[J]. 钢铁, 1998, 33(10): 15-18.
- [2] Jung SungMo, Rhee ChangHee, Min DongJoon. Thermodynamic Properties of Manganese Oxide in BOF Slags[J]. ISIJ International, 2002, 42(1): 63-70.
- [3] Matti Juhani Luomala, Timo Matti Juhani Fabritius, Esa Olavi Virtanen. Splashing and Spitting Behaviour in the Combined Blown Steelmaking Converter[J]. ISIJ International, 2002, 42(9): 944-949.
- [4] Wang Wenjing. 多孔射流顶吹转炉的三维可压缩流体模拟[J]. 现代冶金, 2013, 2(1): 32-40.
- [5] 姜文涛, 李勇, 朱苗勇. 顶底复吹转炉内气液两相流行为的数值模拟[J]. 过程工程学报, 2011, 11(6): 76-80.

宁林新(1979-),女,硕士(2004 年北京科技大学),高级工程师,2001 年北京科技大学(本科)毕业,冶金工艺技术仿真模拟研究。E-mail: ninglinxin@163.com

收稿日期: 2016-02-06

欢迎订阅 2016 年《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