

钢包精炼炉(LF)钢液流动的数学物理模拟与优化

朱立光 王硕明 段云祥

(河北理工大学冶金工程学院,唐山 063009)

梁 玫 张建设 黄永建

(石家庄钢铁公司技术中心,石家庄 050031)

摘 要 应用相似原理和流体力学理论,利用电导率法和 PHOENICS 平台对钢包精炼炉(上、下口直径分别为 2 310 mm 和 1 984 mm,内腔高 2 620 mm,透气砖直径 104 mm)钢液流动状态进行了水模拟和数学模拟,由实验和计算结果得出,离钢包底中心 520 mm 的 2# 底吹位置比离中心 354 mm 的 1# 位置获得的流场和均匀时间更合理,在 ≤ 300 L/min 时,随吹气量增大,混匀时间减少,但 > 300 L/min 时,继续增大吹气量,混匀时间不再变化。40 t BOF-LF-CC 生产结果表明,采用优化工艺后,钢中全氧量降低 2×10^{-6} ,达到 15.2×10^{-6} ,钢中夹杂物也显著减少。

关键词 钢包炉 吹氩 流动 模拟 优化

Math-Phys Simulation and Optimization of Molten Flow in Ladle Furnace

Zhu Liguang, Wang Shuoming and Duan Yunxiang

(College of Metallurgical Engineering, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009)

Liang Mei, Zhang Jianshe and Huang Yongjian

(Technology Center, Shijiazhuang Iron and Steel Co, Shijiazhuang 050031)

Abstract Using similitude principle and hydrokinetics theory, the water simulation and mathematic simulation of molten steel flow condition in ladle furnace (upper and bottom diameter- 2 310 mm and 1 984 mm, height of ladle furnace- 2 620 mm, porous block diameter- 104 mm) have been carried out by conductivity testing and Phoenics software. The test and results showed that the molten steel flow pattern and mixing time at 2 # blowing location (520 mm from ladle bottom center) was more idea than that at 1 # blowing location (354 mm from ladle bottom center); and as argon flow rate no more than 300 L/min, with increasing blowing rate the mixing time decreased, as argon flow rate more than 300 L/min, with further increasing blowing rate the mixing time no longer change. The results of 40 t BOF-LF-CC production showed that with using optimum process the total oxygen content in steel decreased by 2×10^{-6} , to 15.2×10^{-6} , and the amount of inclusion in steel decreased obviously.

Material Index Ladle Furnace, Argon Blown, Flow, Simulation, Optimization

由于理论上的认知和实践上的经验限制,大部分企业的 LF 精炼站尚未充分发挥应有的冶金作用,达不到预期的脱硫、升温、去除夹杂的效果^[1]。

本实验针对我国普遍使用的 40 t LF,对其精炼过程中的钢水流动状态进行研究,应用相似原理和流体动力学理论建立物理模型和数学模型,优化影响流动状态的底吹氩位置和吹气量,进而达到促进脱硫、提升温度、去除夹杂的效果。

1 数学模拟

钢水在 LF 内的流动是一个复杂的湍流流动过程^[2-8],其主要特征是不规则性、有旋性、三维性、扩散性和耗散性。本研究应用 PHOENICS 平台通过几何造型、设置流体区域的物理性质或物

理模型、设置流体区域的边界条件、生成流体区域网格和求解进行数学模拟。

2 物理模拟

2.1 建模依据

根据相似原理,对吹气搅拌的 LF,除模型与实型的几何相似外还要保证修正的佛鲁德准数相等^[9,10],即

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

修正的 Fr 准数可以定义为:

$$Fr' = \frac{\rho_g u^2}{(\rho - \rho_g) g H} \approx \frac{\rho_g u^2}{\rho g H} \quad (2)$$

式中: u -特征速度; H -熔池深度; ρ_g, ρ -气体和液体

的密度。

特征速度 u 可由下式给出:

$$u = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (3)$$

式中: Q -气体体积流量; D -喷嘴直径。

将(3)式代入(2)式,可得:

$$Fr' = \frac{1.62 \rho_g Q^2}{\rho d^4 g H} \quad (4)$$

本试验模型与实型的几何比例为 1:2。

将(4)式代入(1)式,可得:

$$Q_m = 0.0779 Q_p \quad (5)$$

式中: Q_m -模型气体体积流量; Q_p -实物气体体积流量。

原型与模型的主要参数如表 1 所示。

表 1 原型与模型钢包主要尺寸/mm

Table 1 Main dimension of antetype and model of ladle / mm

项目	上口直径	下口直径	内腔高度	透气砖直径
原型	2 310	1 984	2 620	104
模型	1 155	992	1 310	52

2.2 物理模型及试验方法

试验装置及底吹气路如图 1 所示。

通过改变底部供气位置、底部供气量及示踪

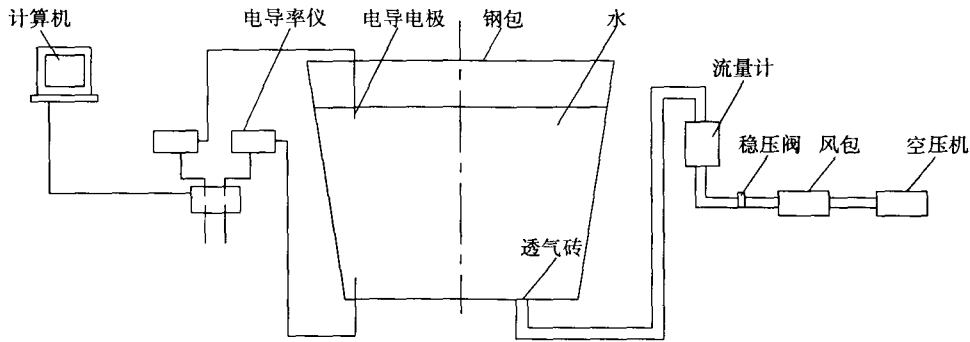


图 1 LF 水模型试验装置图

Fig.1 Schematic of LF water model test device

剂加入位置来研究钢包精炼炉(LF)的供气量和供气位置对流场、混匀时间以及夹杂物上浮的影响、示踪剂加入位置对混匀时间的影响。

根据数学模型的模拟结果,本试验选取了 1# 位置(距中心 177 mm)、2# 位置(距中心 260 mm)以及 3# 位置(中心位置)加以进一步研究,以确定最佳的吹气位置。

根据佛鲁德准数相等,确定模型与实际气体流量见表 2。水模型的水位高度为 950 mm。

混匀时间可以通过测定所加入示踪剂电导率的方法来确定。混匀时间实质上取决于钢水的流动状态和循环速度。因此,可用混匀时间来间接判定钢液的搅拌能力,混匀时间越短,钢液的搅拌能力越强。试验中,先把电导电极固定在水中某一位置,然后调节流量计使之稳定在某一值,在钢包顶部某位置注入 100 mL 接近饱和的 KCl 溶液,同时使电导率仪和计算机程序开始工作,计算机开始采集各电极固定点的电导值,直至各点的电

表 2 实际气体流量与模型气体流量对照

Table 2 Comparing gas flow rate of antetype with gas flow rate of model

原型/L·min ⁻¹	模型/L·min ⁻¹	模型/m ³ ·h ⁻¹
50	3.90	0.23
100	7.79	0.47
150	11.69	0.70
200	15.58	0.93
250	19.48	1.17
300	23.37	1.40
350	27.27	1.64
400	31.16	1.87
450	35.06	2.10

导率一致为止,从起始至电导率仪一致所需时间即为混匀时间。

3 研究结果与分析

3.1 供气量及底吹位置对混匀时间的影响

物理模拟中通过在顶部中心位置加入热水来模拟电极加热装置,加入塑料粒子模拟夹杂物来研究底吹位置对流场的影响。

当底吹位置在中心时,形成一个倒锥形的较为活跃的区域,出现明显的贯穿流,可见,中心位置是不可取的。对于 1[#] 和 2[#] 位置可通过物理模拟和数学模拟进行确定,优化出理想的吹气位置和吹气量。

图 2 为氩气流量控制在 100 L/min 时 1[#]、2[#]

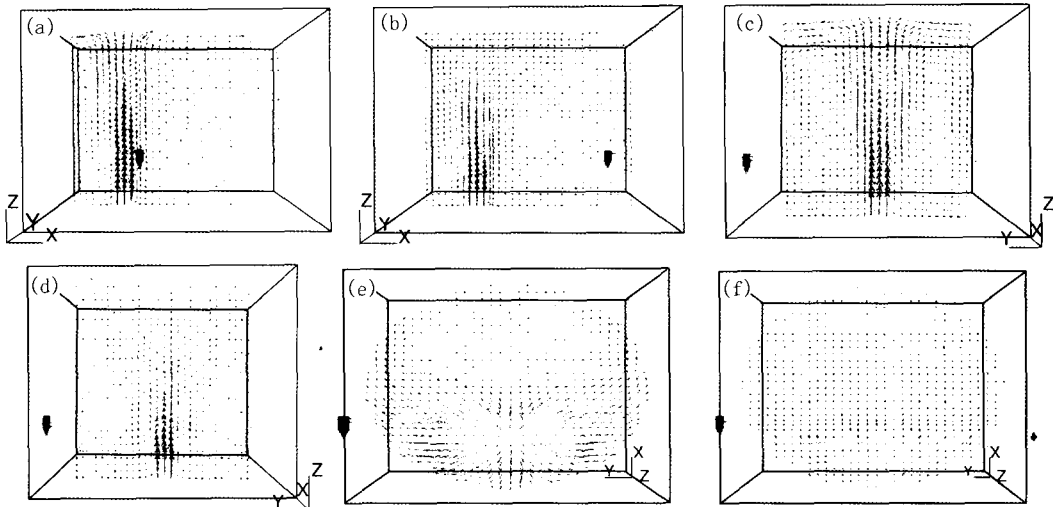


图 2 1[#] 底吹位置-(a) XZ 面,(b) YZ 面和(c) XY 面钢液近表面和 2[#] 底吹位置-(d) 中心处 XZ 面,(e) 中心处 YZ 面和(f) XY 面钢液远表面的流场示意图

Fig.2 Fluid field of 1[#] location at bottom-section XZ face (a), YZ face (b) and XY face, near surface of molten steel (c); and 2[#] location at bottom-section XZ face (d), YZ face (e) and XY face, far from surface of molten steel (f)

表 3 模型与原型 1[#] 和 2[#] 位置混匀时间和气量对照
Table 3 Comparing mixing time and flow rate of 1[#] and 2[#] flow location of antetype with that of model

模型流量 /m ³ ·h	混匀时间/min			
	1 [#] 底吹位置		2 [#] 底吹位置	
	模型	折合成实际	模型	折合成实际
0.23	1.23	1.60	1.25	1.62
0.47	0.97	1.26	0.87	1.13
0.70	0.87	1.13	0.77	1.00
0.93	0.78	1.01	0.70	0.91
1.17	0.68	0.88	0.65	0.84
1.40	0.65	0.84	0.61	0.79
1.64	0.65	0.84	0.67	0.87
1.87	0.67	0.87	0.67	0.87
2.10	0.67	0.87	0.67	0.87

(1.40 m³/h)。在拐点前,一般随供气量增加混匀时间明显减小。在拐点后,供气量增加混匀时间减小不明显,甚至反而延长。因此,对于某一种透气砖在底吹位置一定时,存在一个临界值,即对熔池混匀来说,在低于临界值以下时,熔池混匀效果受底吹气体流量的影响较大,而大于此值影响则减小。相反,对渣-金-气反应,液-液,液-气之间的

透气砖位置的钢水流场。通过比较,可以得出 2[#] 位置优于 1[#] 位置的结论。

在 1[#] 和 2[#] 位置吹氩,分别测定了不同气量时的混匀时间,见表 3。

由图 3 可见,无论是 1[#] 位吹氩,还是 2[#] 位吹氩,在供气量与混匀时间关系曲线上均有一拐点

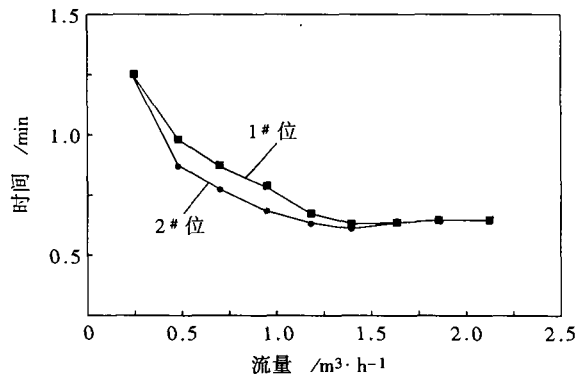


图 3 不同底吹位置时流量对混匀时间的影响

Fig.3 Effect of flow rate at different blowing location on mixing time

作用和传质来说,其效果在气体流量低于某一值时比较小,而高于某一值时,则显著增大。对于 LF 底吹氩条件下,其现场临界值为 300 L/min(折合成实际)。

根据试验可以得出,在 1.40 m³/h 附近存在一个转折点,在转折点之前,混匀时间随气体流量增

加而减小,而转折点之后,混匀时间减小不明显,甚至增大。而且从试验还可以得出,当流量小于 $0.25 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,1#位置混匀时间最短;而大于 $0.25 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,2#位置混匀时间最短。在目前各企业实际生产条件下,2#位置吹氩较1#位置吹氩好。

3.2 添加剂加入位置对混匀时间的影响

添加剂加入位置对混匀时间也有一定的影响。通过试验找出添加剂(合金)加入的合适位置,可以指导现场的实际生产。试验中示踪剂根据二分法选取不同位置加入,底部送入气量为 $1.40 \text{ m}^3/\text{h}$,测定混匀时间,并对数据进行图形处理,得到加入位置与混匀时间的关系(图4)。试验结果表明,距钢包中心 $1/3R$ 范围内加入,混匀时间较短,有利于添加物的混匀及夹杂物上浮;在此区域之外各点加入,混匀时间相对较长。因此,投入添加剂的位置在钢包偏向中心位置较好。

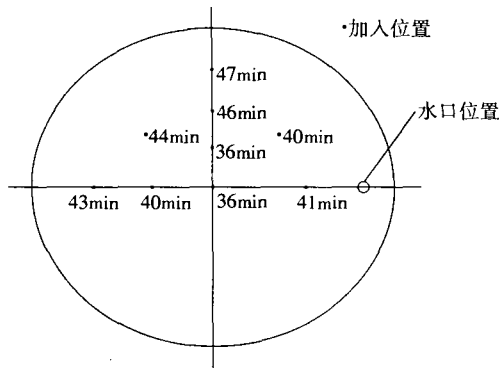


图4 钢包添加剂加入位置对混匀时间的影响

Fig.4 Effect of adding location of additive in ladle on mixing time of molten time

3.3 夹杂物上浮情况

在模型中加入直径 1 mm 左右,密度约为 $0.99 \text{ g}/\text{cm}^3$ 塑料粒子,观察塑料粒子在模型中的行为。试验观察发现,大量已上浮到表面的粒子被流体带动重新回到流体内部,这部分粒子可视为被卷入水中的,相当于已上浮到钢液界面处但未被炉渣及时吸收的粒子又被钢水卷入的情况。另一部分粒子已接近表面,但由于表面流动速度快,也被夹带回流体内部。当底吹流量过小时,底吹氩对粒子上浮数没有多大影响,原因是由于底吹流量过小对钢水搅拌的性能差,不能促进夹杂物的上浮;随着底吹流量的不断增大,粒子的上浮数也不断增大。但底吹流量太大,在实际钢包精炼过

程中,易造成钢渣卷混和冲刷包壁,钢渣卷混引起渣进入钢液,从而降低钢的质量;冲刷包壁导致钢包包壁耐火材料寿命降低。

3.4 应用效果

在BOF-LF-CC流程上采用优化后的LF底部供气量、吹气位置和合金加入位置,在其他工艺条件相对稳定不变的情况下,取得了降低钢中夹杂和洁净度提高的效果。较改进前铸坯中全氧量降低 2×10^{-6} ,为 15.2×10^{-6} ,显微夹杂体积率降低 0.11% ,为 0.31% ,大型夹杂物质量降低了 $0.02 \text{ mg}/\text{kg}$,为 $0.15 \text{ mg}/\text{kg}$,达到了较高的洁净度水平。

4 结论

(1) 从流场和混匀时间两个方面比较,距模型中心 260 mm 的2#底吹位置优于距中心 177 mm 的1#底吹位置,利于升温和促进夹杂物上浮。

(2) 混匀时间随气体流量增大而减小,但存在一临界值,在气体流量大于临界值时,混匀时间减小不明显,甚至有增大趋势。

(3) 生产中向钢包内投入添加剂(如合金)以距中心 $R/3$ 位置加入为好。

参考文献

- 1 蔡廷书. 炉外精炼工艺技术应用. 四川冶金, 2000(3): 34
- 2 Wei J H, etc. Water Modeling Study of Fluid Flow and Mixing Characteristics in Bath during AOD Process. Ironmaking and Steelmaking, 1999(5): 363
- 3 Gupta D, Lahiri A K. A Water Model Study of the Flow Asymmetry Inside a Continuous Casting Mold. Metallurgical and Materials Transactions B, 1996, 27B: 757
- 4 Nakanishi K, Fujii T, Szekely J. Quality and Yield Improvement using Method of Blowing Argon Stirring. Ironmaking and Steelmaking, 1995(2): 193
- 5 周云, 董元箴, 王海川, 等. 炉外精炼中钢包底吹氩流场的数学模拟. 安徽工业大学学报, 2002(2): 91
- 6 Johansfn St. Fluid Dynamics in Bubble Stirred Ladle. Metallurgical Transactions B, 1988, 19(B): 745
- 7 Seon-Hyo Kim. Physical Modeling of Gas/Liquid Mass Transfer in a Gas Stirred Ladle. Metallurgical Transaction B, 1987, 18(B): 71
- 8 Hsiao Tse-Chaing. Fluid Flow in Ladles-Experimental Results Scand. Metallurgy, 1980(9): 105
- 9 He Qing. Observation of Vortex Formation in the Mold of a Continuous Slab Caster. ISIJ International, 1993, 33(2): 343
- 10 张胤, 贺友多, 王卫海, 等. 钢包吹氩时钢液循环流动过程数学模型研究. 包头钢铁学院学报, 2002(2): 112

朱立光(1965-),男,教授,北京科技大学毕业,从事炼钢、连铸研究。