

钢包底吹氩方式对 LF 精炼的影响

冯聚和¹⁾ 李博斌¹⁾ 魏国增²⁾ 安志²⁾ 李学民²⁾ 贾雅楠¹⁾

1) 河北理工大学河北省现代冶金技术重点实验室, 唐山 063009 2) 唐山钢铁公司二钢轧厂, 唐山 063000

摘要 采用 FLUENT 大型商业软件和水模拟装置对某厂 50t LF 炉底吹氩喷嘴的布置方式进行了数值模拟和水模拟研究。分别讨论了单孔、双孔中心对称和双孔轴对称三种底吹氩喷嘴布置方式对钢液混匀时间的影响和钢液表面的卷渣情况。结果表明, 在相同的吹氩量下, 采用双孔轴对称底吹氩钢液混匀时间最短, 在整个钢包内部及表面, 钢液流动速度均匀而稳定, 基本消除了搅拌“死区”, 可以有效防止钢液卷渣, 并为夹杂物的去除提供良好的动力学条件。

关键词 钢包吹氩; 布置方式; 流场; 液面水平流动; 混匀时间

Effect of different bottom blowing argon methods on LF refining

FENG Ju-he¹⁾, LI Bo-bin¹⁾, WEI Guo-zeng²⁾, AN Zhi²⁾, LI Xue-min²⁾, JIA Ya-nan¹⁾

1) Hebei Key Laboratory of Modern Metallurgy Technology, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, China

2) Second Steelmaking and Rolling Factory, Tangshan Steel, Tangshan 063000, China

ABSTRACT Numerical simulation and physical simulation on the arrangement of 50t LF with a bottom argon blowing nozzle were made by the commercial software FLUENT and a water simulation instrument. The effects of three different bottom argon blowing nozzle arrangement ways (haplopore, binocular central symmetry, and binocular rotational symmetry) on molten steel blending time and entrapped slag were studied. The results show that, with the same amount of argon, bottom blowing argon with binocular rotational symmetry gets the shortest blending time; the homogeneous and steady flow velocity in the surface and internal of the molten steel ladle is attained in the same arrangement ways, which can eliminate the stirring dead zone, avoid slag entrapment in molten steel, and provide favorable dynamic conditions for the removal of inclusions.

KEY WORDS ladle argon blowing; arrangement way; flow field; horizontal flow of liquid surface; blending time

从钢水精炼的发展过程来看, LF 精炼是在钢包吹氩搅拌的基础上发展起来的。在其众多的冶炼工序中, 无论是钢水脱硫, 夹杂物去除, 还是温度调整, 都要基于钢包内钢水之间的良好混合和均匀化。钢水中组分和能量迁移的驱动力主要来自钢水的宏观运动和湍流扩散。作为钢水循环流动的源动力, 钢包吹气搅拌方式和工艺参数在很大程度上决定了钢包内钢水循环流动的状况, 进而对钢水流动中的传热、传质以及夹杂物运动等过程产生显著影响^[1]。

随着科技的进步和工业的发展, 人们对钢质量的要求越来越高, 尤其对钢中夹杂物的含量要求更加严格。为促进夹杂物上浮, 提高钢液纯净度, 需要对 LF 炉精炼的底吹氩工艺进行优化。目前国内大多数 LF 炉都采用单孔偏心吹氩, 由于受卷渣等因

素的影响, 通过单孔增加气量来加强搅拌已很有限。基于这些原因, LF 炉双孔底吹氩已引起人们的关注, 但对双孔底吹氩布置方式与搅拌效果关系的研究还不成熟。本文针对某厂 50t LF 精炼炉, 通过数学模拟和水模拟实验对不同底吹氩喷孔分布下钢包内的流场、钢液表面流动速度及混匀时间进行研究, 提出合理的底吹氩喷孔布置方式, 以促进现场生产顺利进行。

1 数学模型

作为研究传递过程和传输现象的重要方法之一, 数学模型主要通过求解湍流 Navier-Stokes 方程, 以及在对流/湍流扩散形式下, 求解温度和化学组分等的守恒方程来描述吹气钢包体系内流动和混

合现象,其中吹氩搅拌过程钢水运动的驱动力主要来自吹入气体的浮力,这使得运动的钢水具有两相流的特征,故本文采用两项流模型.

1.1 基本假设

首先对钢包吹氩过程作以下假设:

- (1) 流体为不可压缩的粘性流体,密度为常数.
- (2) 流体的自由面为光滑的水平面.
- (3) 钢包吹氩过程中,气泡浮力是驱使钢液循环流动的主动动力.
- (4) 气泡为大小均匀,具有同一直径(d_b)的球体.

1.2 基本方程

LF 精炼过程中,当吹入气体流量保持不变时,钢包内钢水的流动状态会很快稳定并长时间地保持下去,这种仅与空间有关而与时间无关的流动状态通常被称为稳态.描述三维稳态湍流流动分别使用了下列方程^[2]:

(1) 连续方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

式中, ρ 是密度; u 为时均速度.

(2) 动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \tag{2}$$

式中, p 为流体微元上的压力; μ_{eff} 为湍流有效粘性系数; g 为重力加速度.

(3) 湍动能方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i k - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = G_k - \rho \epsilon \tag{3}$$

式中, k 为湍动能; σ_k 为湍动能 k 对应的 Prandtl 数; G_k 是由于平均梯度引起的湍动能 k 的产生项; ϵ 为湍动耗散率.

(4) 湍动能耗散率方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \epsilon - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) = \frac{C_1 \epsilon G_k}{k} - \frac{C_2 \rho \epsilon^2}{k} \tag{4}$$

$$G_k = \mu_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{5}$$

式中, σ_ϵ 为湍动耗散率 ϵ 对应的 Prandtl 数; C 为经验常数; μ 是分子粘性系数.

(5) 辅助方程:

$$\begin{cases} \mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \\ \mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon \end{cases} \tag{6}$$

式中, μ_t 为表观湍流粘性系数; C_μ 为经验常数.

1.3 边界条件

在钢包侧壁和底部的固体壁面,对速度、压力使用无滑移边界条件,将 k 和 ϵ 设为零;在自由液面,气体以它到达顶表面的速度离开钢包,液体则不允许离开体系,对两相均给出一个零剪应力条件, k 和 ϵ 也引入零梯度边界条件;将底吹氩气孔定为入口,入口采用质量进口边界.

1.4 数值求解

钢包吹氩搅拌流场和钢液流动速度的计算是在 PC 机上利用商业软件 FLUENT 完成的.利用 FLUENT 软件的 Mixture 多项流模型对钢包流场进行了模拟显示,并对钢液表面的流动速度进行计算^[3].

2 数值模拟结果

某厂由于在原基础上进行过扩容处理,所以包底近似椭圆.有研究表明,单孔底吹喷孔距包底中心 $0.4R \sim 0.7R$ 处可取得良好的精炼效果.但对双孔底吹喷孔布置方式研究存在不同的结论^[4-7].原钢包吹氩孔位于距钢包 $0.55R$ 处,位置合理,现计划在原来钢包基础上再新加一个吹氩孔,使钢包在双孔喷吹下取得良好的精炼效果.根据现场生产要求,底吹氩喷孔的布置分三种方式如图 1 所示.

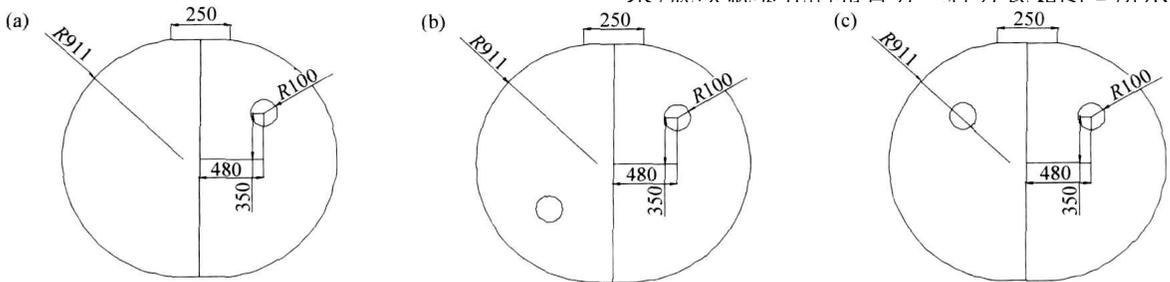


图 1 底吹氩喷孔布置方式示意图. (a) 单孔底吹; (b) 双孔中心对称底吹; (c) 双孔轴对称底吹(单位:mm)

2.1 流场模拟结果

利用 FLUENT 软件对吹氩量 $Q_{Ar} = 200 \text{ NL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时三种底吹氩喷孔布置方式下钢包内钢液流

场进行模拟,为更有效的找到不同喷孔布置方式对

流场的影响,对钢包内不同截面的流场图进行分析.图 2 为单孔偏心底吹不同截面的流场图.采用

单孔偏心底吹氩时, 在远离喷孔的一侧形成一个大循环区, 在靠近喷孔的一侧形成一个小循环区. 在大循环区上部, 即靠近液面的喷孔正上方区域, 钢液的流动速度较快, 搅拌较好, 但在远离喷嘴一侧的上部包壁附近搅拌很弱. 在大循环的中心, 钢液流动速度较小, 搅拌较弱. 从图中可以看出循环中心处

于钢包心部, 钢包下部流动速度较弱.

如图 3 采用双孔中心对称底吹氩时, 在喷孔附近钢液的流场和单孔底吹氩喷孔附近的流场基本相似, 形成一个大循环和一个小循环. 但大循环中心的弱势区较单孔底吹氩小, 钢包中心区域的钢液搅拌较弱, 可能是由钢包上部两股流动发生碰撞产生

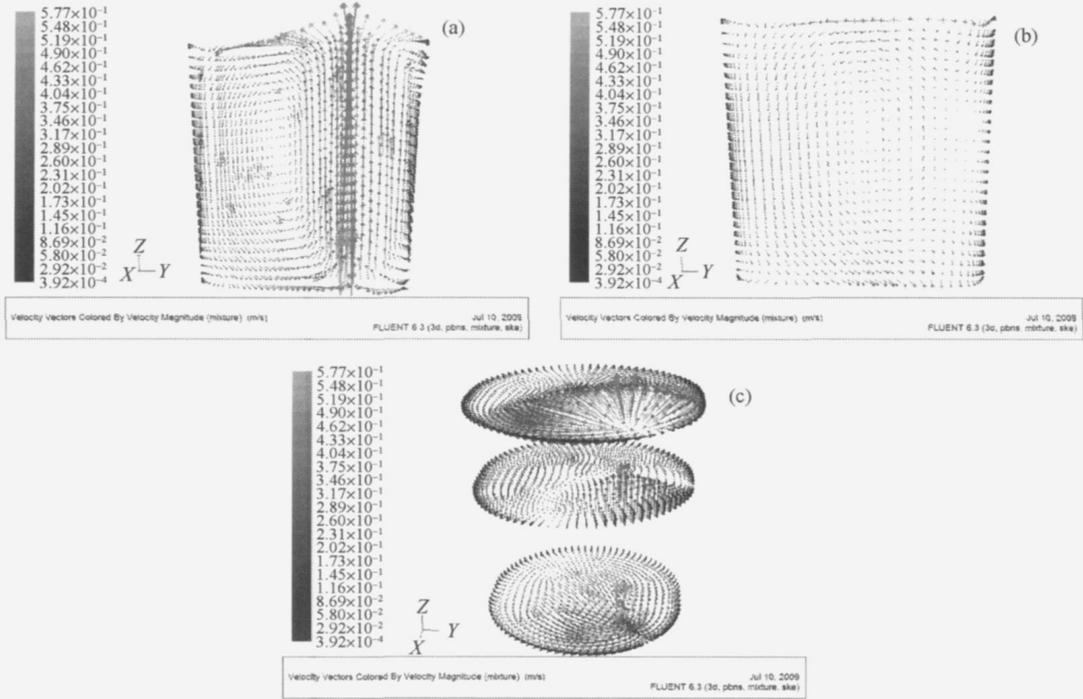


图 2 单孔偏心底吹不同截面的流场图. (a) $X=480\text{ mm}$ 截面; (b) $X=0\text{ mm}$ 截面; (c) $Z=50, 1350, 2125\text{ mm}$ 截面

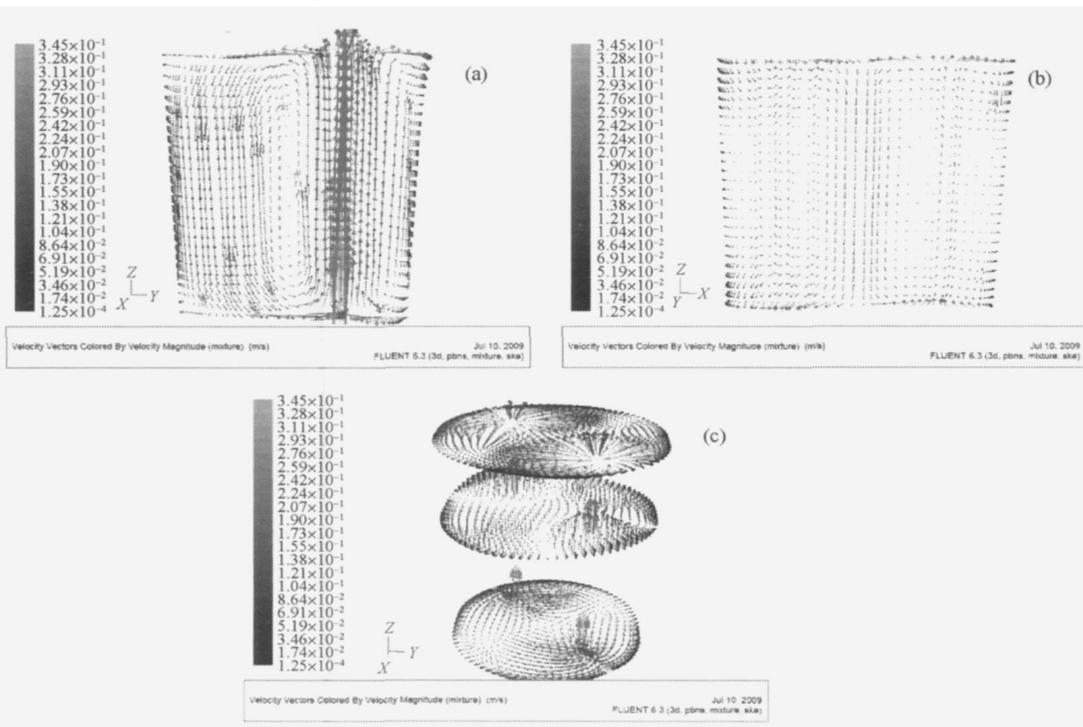


图 3 双孔中心对称底吹不同截面流场图. (a) $X=480\text{ mm}$ 截面; (b) $X=0\text{ mm}$ 截面; (c) $Z=50, 1350, 2125\text{ mm}$ 截面

能量损失造成的.

如图4所示,采用双孔轴对称底吹氩时,在喷嘴正上方形成两个倒锥形的气液两相区,随着高度上升两个气液两相区直径逐渐变大,到达液面时相互融合成一个大的气液两相区. 两相区带动钢液在远

离喷嘴的钢包一侧形成一个大的循环,钢包心部的流动速度较大,消除了以上两种底吹方式中钢包心部搅拌弱的缺点. 整个钢包内钢液流动速度均匀而稳定,基本消除了搅拌“死区”.

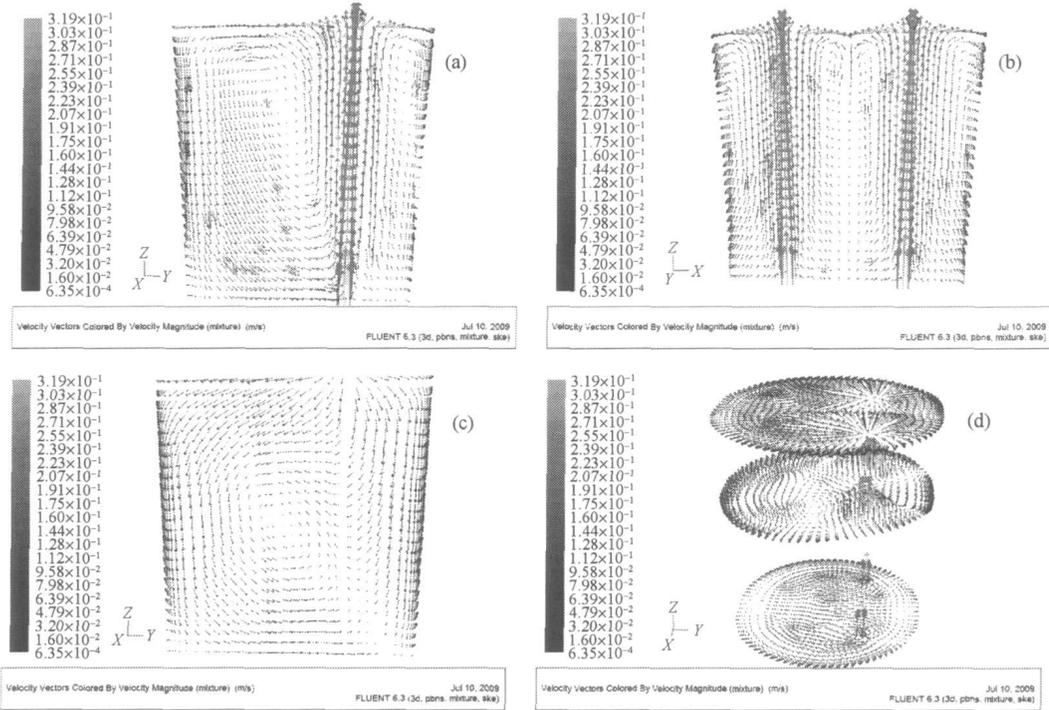


图4 双孔轴对称底吹氩不同截面的流场图. (a) $X=480$ mm 截面; (b) $Y=350$ mm; (c) $X=0$ mm 截面; (d) $Z=50, 1350, 2125$ mm 截面

2.2 钢液面流动速度分析

很多研究都证实,渣/钢界面韦伯数(We)是这一过程中起决定性作用的控制参数, $We = 12.3$ 是液/液分层流界面出现卷混的临界条件^[2]. 渣/钢界面韦伯数可如式(7)所示,当界面湍动时,假设渣/钢界面表面张力($\sigma_{\text{steel-slag}}$)降至原值的1%~10%.

$$We_{bc} = \frac{v_{\text{steel}}^2 \rho_{\text{steel}}}{\sigma_{\text{steel-slag}} (\rho_{\text{steel}} - \rho_{\text{slag}})^{1/2}} \quad (7)$$

当 $\sigma_{\text{steel-slag}} = 0.012 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,

$$\frac{v_{\text{steel}}}{\left[\frac{12.3 \times [0.012 \times 9.81(7000 - 3500)]^{1/2}}{7000} \right]^{1/2}} = 0.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

式中, We_{bc} 是渣/钢界面韦伯数; v_{steel} 是渣/钢界面钢液流动速度; ρ_{steel} 是钢密度; ρ_{slag} 是渣密度. 数值模拟中,主要考虑的是钢液表面水平流的速度,因此速度 $v_{\text{steel}} = 0.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 可以看作是渣/钢卷混的临界速度.

图5为 $Q_{Ar} = 200 \text{ NL} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下,不同方式底吹钢液表面速度分布云图和 X - Y 散点图. 从图5

中可以看出,采用单孔吹氩钢液表面的流动速度最高达 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 超过卷渣临界速度;采用双孔中心对称和双孔轴对称底吹氩钢液表面的最大流动速度分别为 $0.17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 均低于卷渣临界气量. 由此表明,在底吹氩气量一定和不产生卷渣条件下,采用双孔吹氩可以降低钢液表面的流动速度,为增加吹氩量和加强钢包内整体搅拌效果提供可靠的依据. 双孔中心对称底吹时,在钢液表面两喷孔的中心线附近,由于流动速度相反的水平流发生“碰撞”速度很小,很有可能生成漩涡导致卷渣;双孔轴对称底吹时,整个钢液表面钢液的流动速度稳定而且均匀,这为夹杂物的去除提供了良好的条件.

2.3 底吹方式对混匀时间的影响

选取模型与原钢包比例系数 $\lambda = 1:4.7$, 利用“刺激响应”技术来测定混匀时间,即向水模钢包内加入一定量的 NaCl 溶液,利用电导率仪测定熔池内电导率的变化,混匀时间最终根据电导率波动不超过稳定值的5%来确定. 在保证弗鲁德准数相等的条件下,对 $Q_{Ar} = 200 \text{ NL} \cdot \text{min}^{-1}$ 不同吹氩方式下

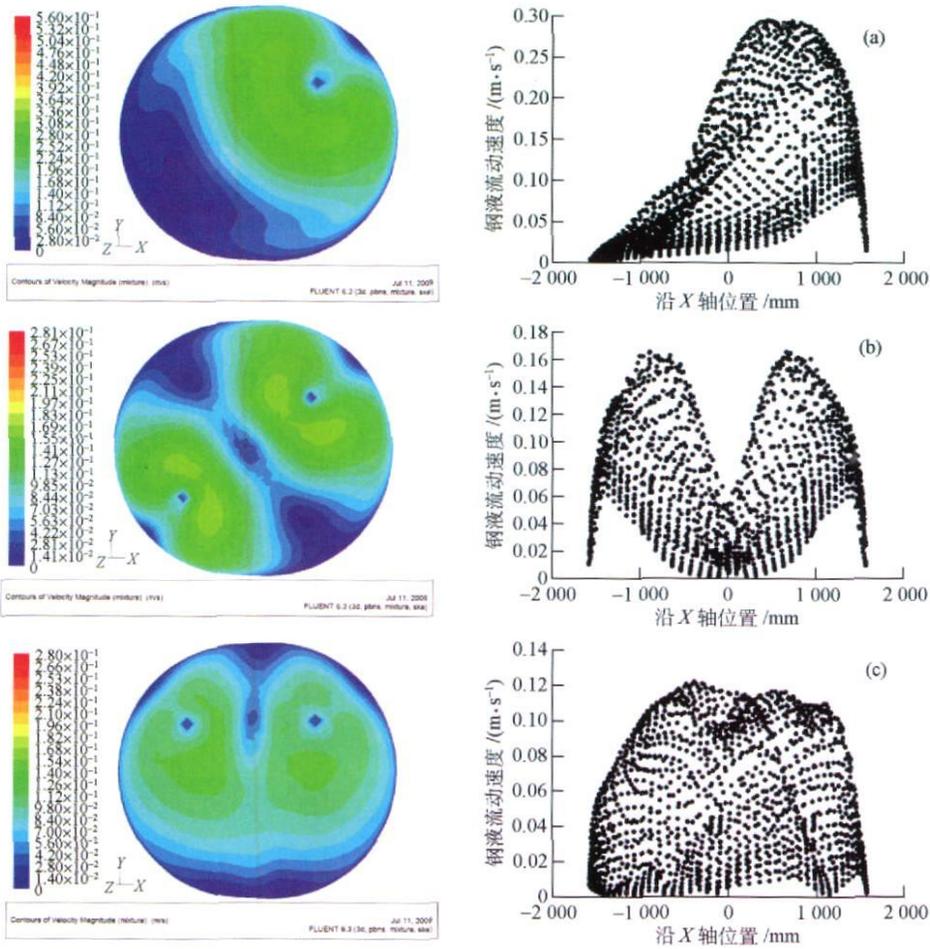


图5 $Q_{Ar}=200 \text{ NL} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下,不同方式底吹钢液表面速度分布云图(左)和 X-Y 散点图(右)。(a) 单孔底吹; (b) 双孔中心对称底吹; (c) 双孔轴对称底吹

的混匀时间进行测定。

$$Fr' = \frac{\rho_g u^2}{\rho_l g H} \quad (8)$$

式中, Fr' 为修正弗鲁德准数; ρ_g, ρ_l 分别为气体和液体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; H 为熔池高度, m ; u 为特征速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由 $(Fr')_m = (Fr')_p$, 可得:

$$Q_m = \left[\frac{\rho_{g,p}}{\rho_{g,m}} \cdot \frac{\rho_{l,m}}{\rho_{l,p}} \left(\frac{d_m}{d_p} \right)^4 \left(\frac{H_m}{H_p} \right) \right]^{\frac{1}{2}} Q_p \quad (9)$$

式中, m 代表模型, p 代表原型; Q 为气体体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; d 为供气孔有效直径。 $d_m = 18 \text{ mm}$, 计算得到 $Q_m = 1.31 \text{ NL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。混匀时间测定结果如下表 1 所示。

表 1 不同方式吹氩混匀时间比较

底吹方式	单孔	双孔中心对称	双孔轴对称
混匀时间/s	156.58	114.51	101.96

3 结论

在相同的吹氩量下,采用双孔轴对称底吹氩时整个钢包内钢液流动速度均匀而稳定,基本消除了搅拌“死区”;钢液表面的流动速度均匀而且稳定,为夹杂物的去除提供良好条件;采用该种吹氩方式混匀时间最短,可加速钢液混匀。为了加强钢液搅拌,可采用双孔底吹加大吹氩量而不致引起卷渣。

参 考 文 献

[1] Feng J H, Ai L Q, Liu J H. *Hot Metal Pretreatment and Secondary Refining*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005 (冯聚和,艾立群,刘建华. 铁水预处理与钢水炉外精炼. 北京:冶金工业出版社,2005)

[2] Zhu M Y, Xiao Z Q. *Steel Refining Process Simulation of Mathematical Physics*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998 (朱苗勇,肖泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟. 北京:冶金工业出版社,1998)

6 结论

(1) LF 精炼生产 A36 和 45A 钢, 当(FeO + MnO)含量(质量分数)小于 1%时, 钢水活度氧小于 5×10^{-6} . 精炼后钢水[S]含量(质量分数)分别达到 0.012% 和 0.010%, 脱硫率分别为 61.3% 和 64.3%.

(2) 比较进站时和精炼后 A36 及 45A 钢中各成分的含量可知, [P]含量(质量分数)都增加了 0.002%, [H]含量分别增加了 0.36×10^{-6} 和 1.26×10^{-6} , [N]含量分别下降 2×10^{-6} 和增加 7×10^{-6} .

(3) 精炼对钢中夹杂物去除率平均为 70.27%, 最高为 85.62%.

参 考 文 献

- [1] Wu W, Liu L. Study on smelt high phosphorus content hot emetal by combined blowing converter. *Steelmaking*, 2008, 24(3): 30
(吴巍, 刘浏. 高磷铁水冶炼试验研究. 炼钢, 2008, 24(3): 30)
- [2] Zhai J, Wu W, Wu W, et al. Study on inclusions of 45A caster. *IRON STEEL*, 2009, 44(10): 98
(翟俊, 吴巍, 吴伟, 等. 45A 钢方坯夹杂物行为研究. 钢铁, 2009, 44(10): 98)
-
- (上接第 11 页)
- [3] Han Z Z, Wang J, Lan X P. *Fluid Engineering Simulation Examples and the Application of Computer*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004
(韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT: 流体工程仿真计算机实例与应用. 北京: 北京理工大学出版社, 2004)
- [4] Li B X, Gao W F, Yan Z G, et al. Experimental study on argon blowing from bottom of ladle by water model. *Steelmaking*, 2001, 17(4): 44
(李碧霞, 高文芳, 颜正国, 等. 大包底吹氩水模试验研究. 炼钢, 2001, 17(4): 44)
- [5] Xing W, Shen Q Z, Wang X H, et al. Water model and numerical simulation on argon blowing from bottom of ladle. *Steelmaking*, 2005, 21(6): 33
(幸伟, 沈巧珍, 王晓红, 等. 钢包底吹氩过程数学物理模拟研究. 炼钢, 2005, 21(6): 33)
- [6] Ren S B, Chen Y S, Huang Z Z, et al. The discussion of optimized location of two holes in large ladle furnace during argon blowing. *J Buotou Univ Iron Steel Technol*, 2003, 22(3): 193
(任三兵, 陈义省, 黄宗泽, 等. 大型钢包双孔吹氩最佳位置的探讨. 包头钢铁学院学报, 2003, 22(3): 193)
- [7] Pan Y F, Yang X, Wang W H, et al. Feature of 3-D flow field in ladle with eccentric bottom blown argon. *Steelmaking*, 2006, 22(2): 46
(潘贻芳, 杨肖, 王文辉, 等. 偏心底吹氩钢包三维流场的特性. 炼钢, 2006, 22(2): 46)