

RH 处理过程钢液流动行为的三维数值模拟

孙亮¹ 艾立群¹ 赵俊花¹ 黄宗泽²

(1 河北理工大学冶金与能源学院,唐山 063009; 2 宝山钢铁集团公司工艺研究院,上海 201900)

摘要 以 300 t RH-MFB 工艺参数为基础,建立了整个装置内钢液流动的三维数学模型。用双流体模型处理气液两相流,以分析吹氩流量、真空度、吹氩喷嘴排布等因素对钢液流场和循环流量影响。结果表明,当吹氩流量在 4 000 L/min 以下时,循环流量随吹氩流量提高而提高;该装置以 67 Pa,吹氩流量 3 500 L/min,浸渍管浸入深度 600 mm 和上下交错排布 16 个吹氩喷嘴较合理。

关键词 RH-MFB 精炼 钢液流动行为 循环流量 数值模拟

Three-Dimension Numerical Simulation on Liquid Steel Flow Behavior in RH Process

Sun Liang¹, Ai Liqun¹, Zhao Junhua¹ and Huang Zongze²

(1 College of Metallurgy and Energy, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009;
2 Technology Institute, Baosteel Group Corporation, Shanghai 201900)

Abstract Based on process parameters of a 300 t RH-MFB unit, the three-dimension mathematical model for liquid steel flow in whole unit has been established. The gas-liquid two-phase flow was treated and described by double-fluid model to analyze the effect of argon flow rate, vacuum, number and location of nozzles on liquid steel flow field and circulating flow rate. Results show that as argon blowing rate is less than 4 000 L/min, with increasing argon blowing rate, the circulating flow rate increases; and it is available for the unit with 67 Pa, argon blowing rate 3 500 L/min, immersion pipe immersing 600 mm and 16 nozzles arranging in interleaving way.

Material Index RH-MFB Degassing, Liquid Steel Flow Behavior, Circulating Flow Rate, Numerical Simulation

影响 RH 精炼时脱碳的因素有循环流量、比搅拌功率 ε 、传质系数 ka 和真空度等,从生产角度看可改变工艺参数,寻找提高循环流量(搅拌能主要受循环流量的影响)的参数,以提高 RH 精炼的效率。

1 钢液整体流动的数值模拟

国内外许多研究学者对 RH 精炼的钢液流态、循环流量、混合时间和脱碳速率进行了研究^[1]。本文以 300 t RH 精炼装置参数为基础,通过改变参数模拟 RH 装置内钢液流场和循环流量的变化情况,按公式(1)、(2)计算模拟循环流量,与公认的经验公式(3)^[2]计算的循环流量相对比,得出对循环流量影响较大的因素。

$$Q = \rho Q_v \cdot \frac{60}{10^3} \quad (1)$$

$$Q_v = \frac{\pi D_d^2}{4} V_d \quad (2)$$

$$Q = 11.4 G^{1/3} D^{4/3} [\ln(P_1/P_2)]^{1/3} \quad (3)$$

式中: Q - 钢液循环流量/(t · min⁻¹); G - 氩气流量/(L · min⁻¹); D - 上升管直径/m; P_1 、 P_2 - 分别为大气

压力和真空室压力/Pa; Q_v - 钢液体积流量/(m³ · min⁻¹); V_d - 下降管内钢液流速/(m · s⁻¹)。

模型的基本假设为:(1)气液两相区采用双流体模型(Eulerian-Eulerian)^[3];(2)气泡在液体自由表面可与之分离,且气泡为刚性球;(3)用界面摩擦力表征两相流动量传输;(4)真空室表面视为平滑的自由表面;(5)壁面处无滑移,体系处于稳态湍流, k - ε 双方程。

RH 精炼装置中钢液流动可视为稳态不可压缩流动,因此可用连续性方程、动量方程和湍流模型来描述。数学模型的主要参数和钢液物性参数见表 1。

固体壁面、入口和自由面是计算时必须确立的典型边界条件^[1]。

在直角坐标系下建立模型,控制方程采用有限控制体法进行离散;采用相间滑移算法(ISPA)求解本双流体问题^[3]。模型与原型比例为 1:1,对整个计算域网格数划分为 58 × 56 × 46。

2 结果与讨论

图 1 速度流场图的浸渍管长 1 750 mm,真空室

表1 钢液物理性质和数学模型的主要参数
Table 1 Physical property of liquid steel and main parameters of mathematic model

量/ l	钢液			吹氩流量/ (L·min ⁻¹)	钢包/mm			渣线/ mm	浸入深度/ mm	浸渍管径/ mm	浸渍管中心 距i/mm
	温度/ K	密度/ (kg·m ⁻³)	动力粘性系数/ (Pa·s)		上口径	下口径	高度				
300	1 873	7 000	5.7 × 10 ⁻³	2 500 ~ 4 000	3 856	3 620	4 720	1 000	500	750	1 600

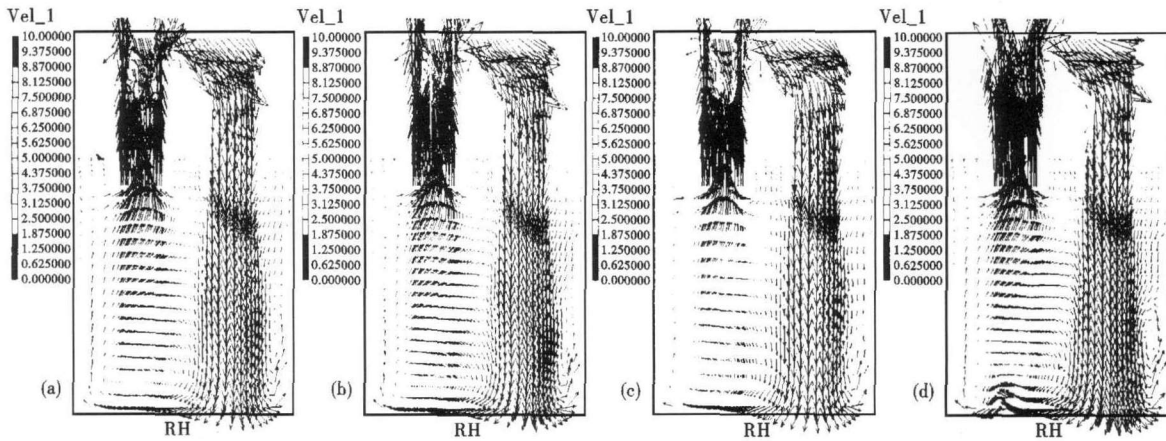


图1 300 t RH-MFB处理时不同吹氩流量下的钢液流场,吹氩流量/(L·min⁻¹):(a) 1 500; (b) 2 000; (c) 2 500; and (d) 3 000
Fig. 1 Liquid steel flow field in 300 t RH-MFB process with different blowing argon rate/(L·min⁻¹): (a) 1 500; (b) 2 000; (c) 2 500; and (d) 3 000

液面高度 400 mm,喷嘴 16 个,两排垂直间距 200 mm,喷嘴内径 7 mm,其它参数见表 1。

2.1 吹氩流量和真空度对钢液流动行为的影响

图 1 是真空度为 67 Pa、不同吹氩流量条件下的钢液流场对比图,不同真空度条件下的类似。从图 1 可见,氩气喷出后,产生浮力带动钢液向上运动,进入真空室后空间突然变大,导致钢液流速降低。钢液由于惯性向下降管方向流去,在下降管部位钢液靠自重流回钢包,冲向钢包底部,在钢包形成两个较大的回旋区。其中较大的向上升管入口流去,形成一次环流;较小的在下降管和靠近钢包侧壁形成相对封闭的环流;其它部位也有较小的环流,但对主体流场影响不大。钢包液面处的速度较其它位置速度要小,说明液面流动较为平稳,可保证熔渣不会卷入钢液,减小了钢液污染。当其它参数不变,只改变吹氩流量时,整体钢液流场变化不大,且从下降管出来的钢液对包底的冲击强度几乎相同(图 2a)。

图 2(b) 是 67 Pa 在不同吹氩流量下,下降管径向截面上钢液速度分布情况,

从图 2(b) 可见,速度在管中分布不均匀、不对称,靠近下降管内侧钢液流速较小,向外侧逐渐增大,接近边壁时流速趋于稳定,且在 0 ~ 250 mm 增加速率较大,而后降低。这可能是由于惯性钢液以一定速度从真空室流向下降管,致使靠近下降管内径外侧钢液流速较大,而内侧较小,这一点从图 1 也能看出,靠近下降管内径外侧的速度矢量大于内侧。模拟的速度分布情况与舒宏富^[4]发表的 RH-MFB 真空精炼过程的物理模拟文章中的情况有所不同,其结论是下降管内流体流速在横纵两直径上基本一致,靠近下降管的外侧流速较小。真空度影响类似。

2.2 吹氩流量和真空度对钢液循环流量的影响

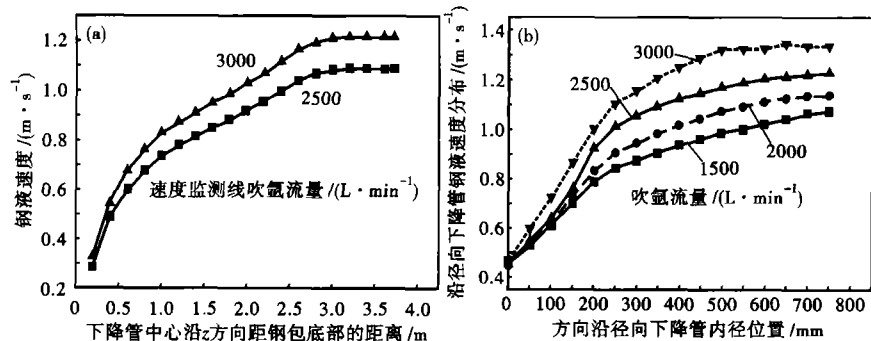


图 2 (a) 不同吹氩流量下钢液从下降管流出的速度;(b) 不同吹氩流量下下降管横截面钢液流速分布

Fig. 2 (a) Liquid steel flow velocity leaving down-leg with different argon blowing rate; (b) Distribution of liquid steel flow velocity along cross section of down-snorkel with different argon blowing rate

图 3 (a) 模拟值的公认经验计算公式为: $Q = 11.4G^{1/3}D^{4/3}[\ln(P_1/P_2)]^{1/3}$, 从图 3 (a) 可以看出, 模拟循环流量值与经验公式计算值在一定吹氩流量范围内吻合的相当好, 在这种条件下吹氩流量为 4 000 L/min 时, 模拟循环流量达到最大值, 超出范围模拟循环流量不在遵循理论公式继续增大, 而是开始稳定甚至呈下降趋势, 可能是吹氩流量过大, 气泡体积所占的比例变大, 形成了气泡管道, 抽引效率

降低, 循环流量不随吹氩流量增加而增加, 循环流量达到所谓的“饱和值”。还可以看出, 循环流量随着真空度的增加而增加。

2.3 吹氩喷嘴排布对钢液流动行为的影响

模拟了吹氩喷嘴不同排布时, 吹氩流量 1 500、2 000、2 500、3 000 L/min 四种情况, 钢液流场形式发生了一些改变, 吹氩喷嘴一致排布时, 上升管对钢液的抽引作用明显低于吹氩喷嘴交错排布, 且下降管

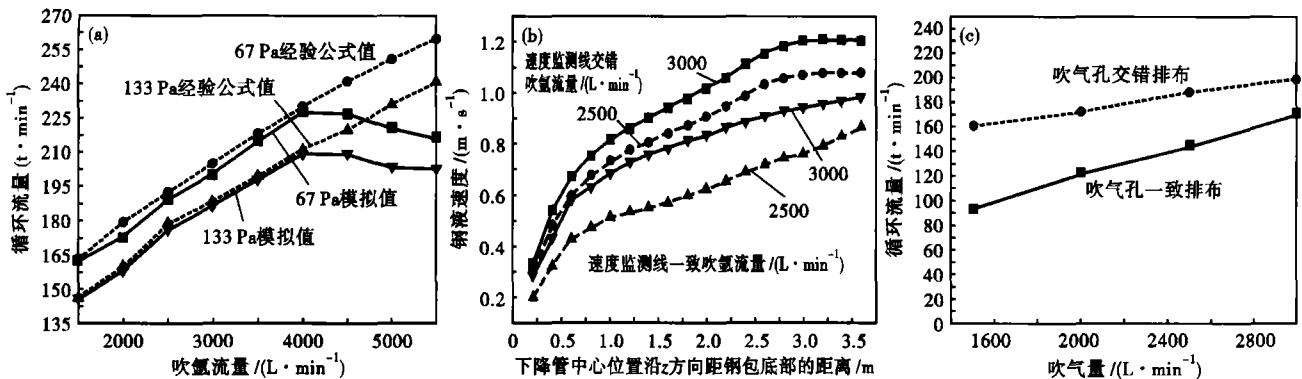


图 3 (a) 在不同吹氩流量和真空度下的循环流量经验值与模拟值比较; (b) 不同吹氩喷嘴排布时钢液从下降管流出的速度; (c) 吹氩喷嘴排布位置不同时的循环流量

Fig. 3 (a) Comparison between experience value and simulation value of circulating flow rate with different argon blowing rate and vacuum; (b) Liquid steel flow velocity leaving down-leg with different argon nozzles arrangement; (c) Circulating flow rate with different argon nozzles arrangement

出来钢液的两大回流区明显减弱, 保留了下降管与包壁侧回流区, 下降管与上升管之间的回流区减弱很大, 上升管只抽引其附近的钢液参加循环, 必然导致混合时间延长, 增加精炼时间, 且上升管和下降管内钢液流速明显低于吹氩喷嘴交错排布情况, 可能是吹氩喷嘴一致排布使吹入的 Ar 气不能均匀分布在上升管内, 大量气体沿上升管壁进入到真空室, 带动钢液的作用减小了, 但从下降管出来的钢液对包底的冲击并没有减少许多, 详见图 3 (b)。

2.4 吹氩喷嘴排布对钢液循环流量的影响

图 3 (c) 是其它参数不变, 只改变吹氩喷嘴排布位置时循环流量的对比图。从图 3 (c) 可见, 相同条件下吹氩喷嘴交错排布时比上下一致排布时的循环流量提高的多, 可能是上下一致排布跟减少吹氩喷嘴个数有相同的效果, 因此现场采用吹氩喷嘴交错排布是合理的。

3 结论

(1) 根据双流体模型建立的数学模型能够较准确的描述钢液在整体装置内的流动行为及循环流量的变化情况。

(2) 提升循环流量的吹氩流量存在一个最大值, 模拟表明该装置吹氩流量为 4 000 L/min 时, 循环流量达到“饱和值”, 模拟计算吹氩流量为 3 500 L/min 时最经济。

(3) 相同条件下, 吹氩喷嘴上下交错排布比上下一致排布时的循环流量提高较多。

参考文献

- 1 魏季和, 胡汉涛. 真空循环精炼过程中钢液流动的数学模拟: 流动的数学模型. 过程工程学报, 2006, 6 (增刊 1): 62
- 2 Kuwabara T, Umegawa K, Mori K, et al. Investigation of Decarburization Behavior in RH-reactor and Its Operation Improvement. Transactions ISIJ, 1988, 28: 305
- 3 Spalding D B. Recent Advances in Numerical Methods in Fluids. Taylor C, Morgan K, Swansea London, eds. UK: Pine Bridge Press, 1980: 139
- 4 舒宏富, 宋超, 张晓峰, 等. RH-MFB 真空精炼过程中循环流量的物理模拟研究. 材料与冶金学报, 2004 (6): 109

孙亮 (1982-), 男, 在读硕士研究生, 2002 年河北理工学院毕业, 纯净钢冶金理论与工艺研究。

艾立群 (1965-), 博士, 教授, 硕士生导师, 纯净钢冶金理论与工艺研究。