

RH 精炼过程钢液流动行为与 循环流量数值模拟

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, 河北 唐山 063009; 2. 上海宝山钢铁集团公司工艺研究院, 上海 201900)

摘 要: 以某厂 300 t RH-MFB 工艺参数为基础, 建立了整体 RH 装置的三维数学模型, 探讨影响钢液循环流量的因素。用双流体模型处理气液两相流, 分析了相同真空度条件下吹氩流量、浸渍管深度、吹氩喷嘴排布等因素对钢液流场和循环流量的影响。结果表明: 吹氩流量在 4 000 NL/min 以下时, 循环流量随吹氩流量增加而提高; 在一定范围内适当增加浸渍管插入深度有利于提升循环流量; 吹氩喷嘴上下交错排布比上下一致排布更合理。

关键词: RH-MFB; 真空精炼; 循环流量; 吹氩喷嘴; 数值模拟

中图分类号: TF769.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-7638(2009)02-0028-05

Numerical Simulation on Molten Steel Flow and Circulation Flow Rate in RH Vacuum Degassing Process

Sun Liang¹, Ai Liqun¹, Zhao Junhua¹, Huang Zongze²

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

Abstract A three-dimensional mathematical model for the simulation of molten steel flow based on the parameters of 300 t RH-MFB has been established, discussing the factors of influencing circulation flow rate. The gas-liquid two-phase flow has been treated and described by two-fluid model. The influences of process parameters under the same vacuum condition on steel flow field and circulation flow rate are simulated, such as argon blowing flux, depth of snorkel, nozzles arrange. The results show that keeping argon blowing flux no more than 4 000 NL/min, circulation flow rate would increase with argon blowing flow rate increasing and with the increase of depth of snorkel a certain extent, it was more proper to arrange nozzles in interleaving way than others.

Key words RH-MFB; vacuum degassing; circulation flow rate; argon blowing nozzle; numerical simulation

0 引言

随着经济建设的迅猛发展, 纯净钢的应用范围越来越广泛, 使冶炼纯净钢或超纯净钢的精炼设备 RH 受到重视。近年来国内外对 RH 精炼及其设备

的研究不断深入, 许多学者对 RH 精炼的钢液流态、循环流量、混合时间和脱碳速率作了大量研究, 但研究中或多或少存在着一定的问题。笔者以某厂 300 t RH 精炼装置工艺参数为基础, 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

收稿日期: 2008-10-10

作者简介: 孙 亮 (1982-), 男, 河北保定人, 在读硕士研究生, 主要从事纯净钢冶金理论与工艺等方面的研究。

况,按公式 $Q = Q_v \frac{60}{10^3}$, $Q_v = \frac{\pi D_d^2}{4} V_d$, 计算模拟循环流量,与文献 [1] 中行业公认的经验公式 $Q = 11.4 G^{1/3} D^{4/3} [\ln(p_1/p_2)]^{1/3}$ (公式中各符号的含义如下: Q —钢液循环流量, $t/m in$; G —氩气流量, $NL/m in$; D —上升管直径, mm ; 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, $m^3/m in$; V_d —下降管内钢液流速, m/s) 计算的循环流量相对比,来验证建立模型的正确性,通过改变相同真空度条件下吹氩流量、浸渍管深度、吹氩喷嘴排布等因素,找到对循环流量影响较大的因素,为现场操作提供理论指导和改变工艺参数提供参考。

1 钢液整体流动的数值模拟

1.1 模型的基本假设

(1) 气液两相区采用双流体模型 (Eulerian-

Eulerian) [2]。

(2) 气泡在液体自由表面可与之分离,且气泡为刚性球。

(3) 真空室表面视为平滑的自由表面。

(4) 气泡直径假设为 12 mm。

(5) 壁面处无滑移,体系处于稳态湍流, $k-\epsilon$ 双方程。

以上假设与实际情况有所差别,但对结果基本特征的影响可以忽略。

1.2 数学模型参数

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 (方程省略)。某厂 300 t RH-MFB 精炼装置的浸渍管长 1 750 mm,真空室钢液面高度 400 mm,喷嘴数为 16 个,喷嘴内径 7 mm,数学模型的其它主要参数和钢液物性参数见表 1。

表 1 数学模型的主要参数和钢液物性参数

Table 1 Main parameters of mathematic model and physical parameters of molten steel

钢液 量 / t	吹氩流量 / ($NL \cdot m in^{-1}$)	钢包 /mm				浸渍管 /mm			钢液物性参数		
		上口径	下口径	高度	渣线	管径	浸入深度	中心距	温度 /K	密度 /($kg \cdot m^{-3}$)	动力粘度 /($Pa \cdot s$)
300	2 500~4 000	3 856	3 620	4 720	1 000	750	500	1 600	1 873	7 000	5.7×10^{-3}

1.3 边界条件

计算时必须确立固体壁面、入口和自由面的边界条件,典型边界条件按文献 [3] 取值。

1.4 数值计算方法

在 Ponec is2006 软件的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 (SPA) 求解本双流体问题 [2]。模型与原型比例为 1:1 整个计算域网格数划分为 $58 \times 56 \times 46$ 。

2 结果与讨论

2.1 吹氩流量对钢液流动行为和循环流量的影响

2.1.1 吹氩流量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。从图 1 可以看出,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,在钢包内形成两个较大的回旋区。其中较大的回流向上升管入口流去,形成一次环流;较小的回流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他位置速度要小,说明液面流动较为平稳,可保证熔渣不被卷入钢液,减小对钢液的污染。还可以看出,其他参数不变,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 2 是不同吹氩流量时钢液从下降管流出的速度对比图。

图 3 是在不同吹氩流量下,下降管径向截面上钢液速度分布情况。从图 3 可见,钢液速度在下降管中分布是不均匀、不对称的,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,下降管内 0 mm 到 250 mm 钢液速率增加幅度较大,而后降低。原因是:在真空室内钢液沿室壁向下降管流去,钢液由于惯性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 中也能看出,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文献 [4] 所述的“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”的情

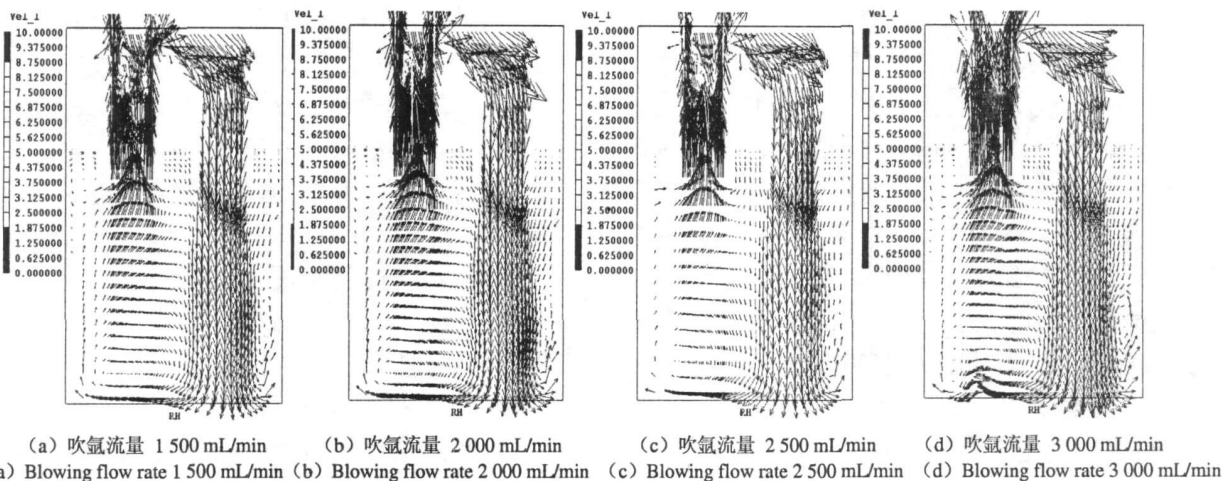


图 1 RH 在不同吹氩流量下的钢液流场

Fig 1 Molten steel flow field in the RH-MFB with different argon blowing flow rates

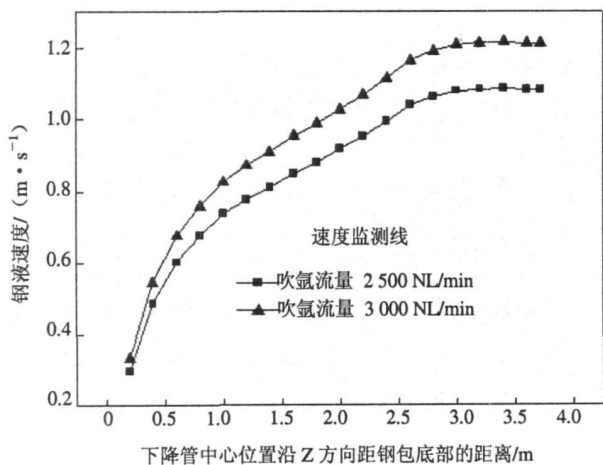


图 2 不同吹氩流量时钢液从下降管流出的速度对比

Fig 2 Comparison of molten steel velocity from down-snorkel with different argon blowing flow rates

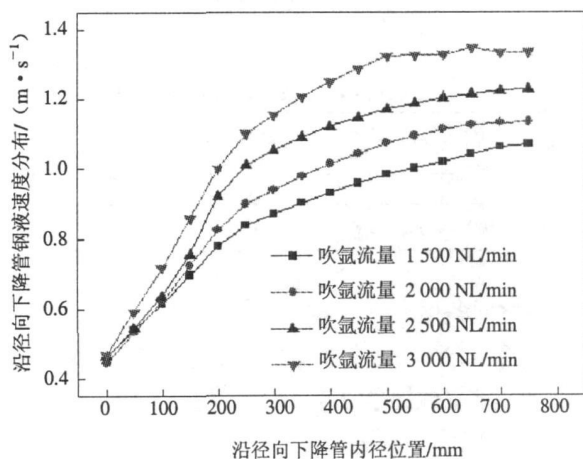


图 3 下降管钢液流速分布

Fig 3 Velocity distribution of down-snorkel on center section under 67 Pa

况有所不同,但真空度影响与其类似。

2.1.2 吹氩流量对钢液循环流量的影响

图 4 是在真空度为 67 Pa 和 133 Pa 时,不同吹氩流量下的经验公式计算循环流量和数值模拟的循环流量的比较。从图 4 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得相当好,验证了模型的可靠性。但在吹氩流量为 4 000 NL/min 时,模拟循环流量达到最大值,超出范围模拟循环流量不再遵循理论公式继续增大,而是开始稳定甚至呈下降趋势,原因是: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”。

从图 4 还可以看出,循环流量随着真空度的增加而增加。但从经济出发吹氩流量控制在 3 500 NL/min 较为合理。

2.2 浸渍管浸入深度对钢液流动行为和循环流量的影响

2.2.1 浸渍管浸入深度对钢液流动行为的影响

图 5 是浸渍管浸入深度分别为 400, 500, 600 mm 的主截面流场图(限于篇幅只将真空度为 67 Pa 和吹气流量为 2 500 NL/min 的流场图示出)。从图 5 可见钢液流场基本变化不大,只是浸渍管浸入深

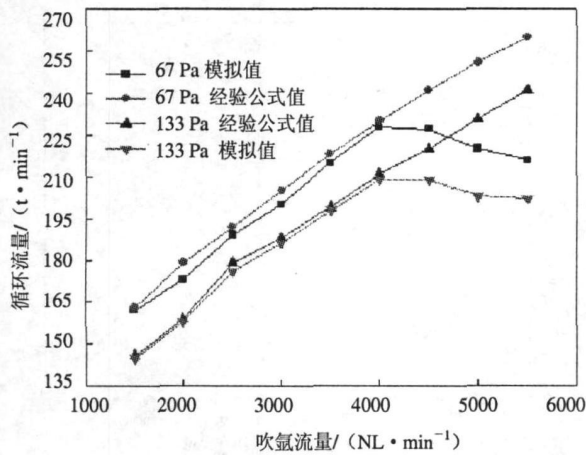


图 4 RH 在不同吹氩流量和真空度下的循环流量经验值与模拟值比较

Fig 4 Comparison of experience and simulation value of circulation flow rate under different argon blowing flow rates and vacuity

度 400 mm 的上升管抽引力不如其它两个大, 这一点可从接近上升管下部的包底钢液流场观察到。

2 2 2 浸渍管浸入深度对钢液循环流量的影响

图 6 是浸渍管浸入不同深度时, 循环流量对比图。从图 6 可见, 在一定的浸入深度范围内, 循环流量随着浸入深度增加而增加。原因是: 浸入深度增加相当于气泡的行程变长, 做功增加, 从而循环流量增大, 进而改善流动促进传质, 提高精炼效率。

2 3 吹氩喷嘴排布对钢液流动行为和循环流量的影响

2 3 1 吹氩喷嘴排布对钢液流动行为的影响

模拟了真空度为 67 Pa 吹氩流量 2 500 3 000 NL/m in 时, 吹氩喷嘴不同排布对钢液流场的影响。从钢液流场图 (限于篇幅未附钢液流场图) 观察到吹氩喷嘴排布一致时, 上升管对钢液的抽引作用明显低于吹氩喷嘴交错排布时的抽引作用, 且下降管

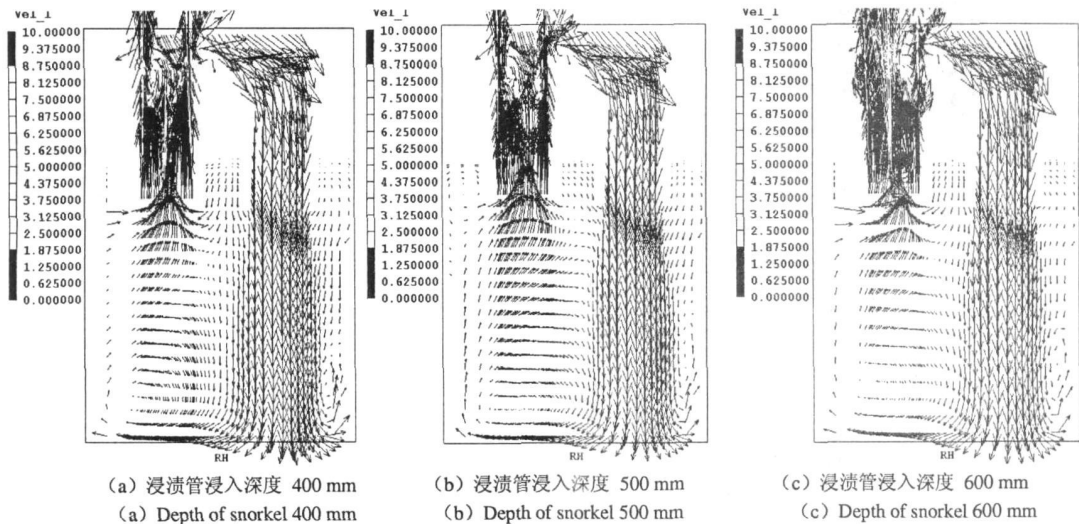


图 5 吹氩流量 2 500 NL/m in 时主截面流线

Fig 5 Stream line pattern of main section under argon blowing 2 500 NL/m in

出来的钢液的两大回流区明显减弱。下降管与包壁侧回流区变化不大, 下降管与上升管之间的主回流区减弱很大, 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。吹氩喷嘴排布一致时上升管和下降管内钢液流速明显低于吹氩喷嘴交错排布的情况, 见图 7。原因是: 吹氩喷嘴一致排布使吹入的氩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, 减小了带动钢液的作用。还可以从图 7 看出, 从下降管出

来的钢液对包底的冲击并没有减少许多。

2 3 2 吹氩喷嘴排布对钢液循环流量的影响

图 8 是其它参数不变, 只改变吹氩喷嘴排布形式时循环流量对比图。从图 8 可见, 相同条件下, 吹氩喷嘴交错排布时的循环流量比上下一致排布时的循环流量更大, 原因仍然是吹氩喷嘴上下排布一致导致气泡在上升管内分布不均, 带动的钢液量减小, 致使循环流量降低。因此现场吹氩喷嘴采用交错排布是合理的。

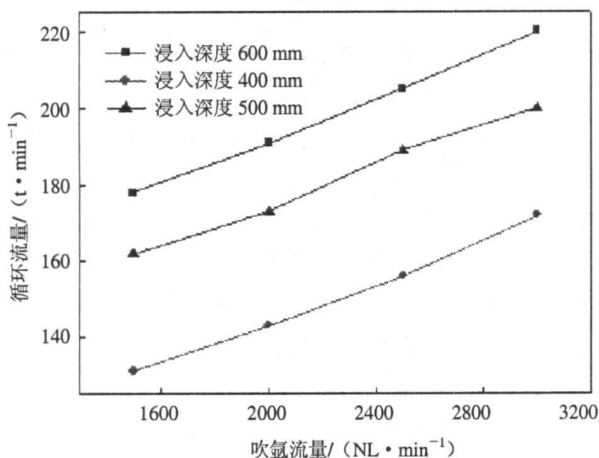


图 6 浸渍管浸入深度不同的循环流量对比

Fig 6 Comparison of circulation flow rate under different depth of immersing

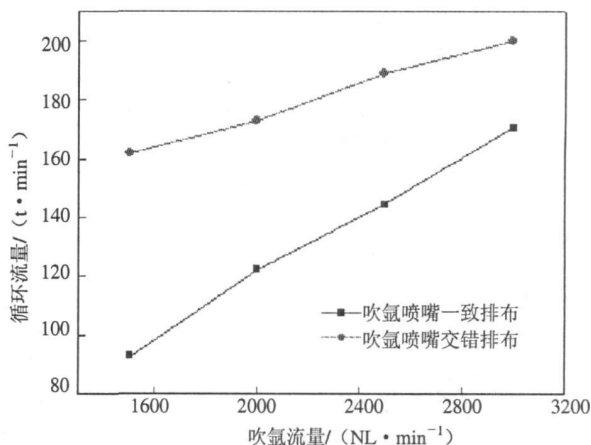


图 8 吹氩喷嘴排布位置不同时循环流量的对比

Fig 8 Comparison of circulation flow rate under different arrange of nozzles

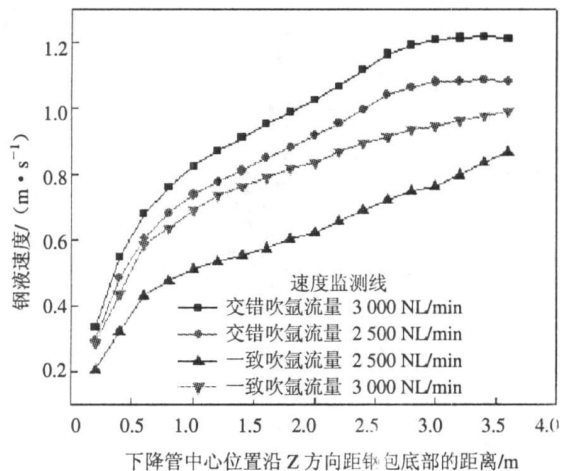


图 7 不同吹氩喷嘴排布时钢液从下降管流出的速度对比

Fig 7 Comparison of molten steel velocity from down-snoke with different nozzles arrange

3 结论

(1)建立的数学模型能够较准确地描述钢液在 RH 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,本模拟表明该装置吹氩流量为 4 000 NL/min 时,循环流量达到“饱和值”,模拟计算吹氩流量为 3 500 NL/min 时较为经济。

(3)相同条件下,适当增大浸渍管的插入深度对提升循环流量有利,本模拟表明该 300 t RH 装置的浸渍管插入深度为 600 mm 时较好。

(4)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大的多,可见现场采用吹氩喷嘴交错排布是合理的。

参考文献

[1] Kuwabara T, Umegata K, Mori K, Watanabe H. Investigation of decarburization behavior in RH-reactor and its operation improvement[J]. Transactions ISI, 1988, 28: 305

[2] Spalding D B. Recent advances in numerical methods in fluids[M]. Taylor C, Morgan K, Swansea London, eds UK: Pine bridge Press, 1980: 139.

[3] Wei Jhe, Hu H antao. Mathematical modeling of molten steel flow in a whole RH degasser during the vacuum circulation refining process: mathematical model of the flow[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2006, 6(Suppl 1): 62- 65. (魏季和, 胡汉涛. 真空循环精炼过程中钢液流动的数学模拟 [J]. 过程工程学报, 2006 6(增刊 1): 62- 65)

[4] Shu Hongfu, Song Chao, Zhang Xiaofeng, Zhang Zhan. Study on circulation flow rate in water model of RH-MFB vacuum refining process[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2004, 6: 109. (舒宏富, 宋超, 张晓峰, 张战. RH-MFB真空精炼过程中循环流量的物理模拟研究 [J]. 材料与冶金学报, 2004 6: 109)

编辑 余文华