

RH 喷粉精炼过程流动行为数值研究

刘壮, 娄文涛*, 朱苗勇*

东北大学冶金学院, 沈阳 110819

Numerical Research on the Flow Behavior of RH-degasser Powder

Injection Refining Process

Liu Zhuang, Lou Wentao*, Zhu Miaoyong*

School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, 110819, China

1. 前言

对于高品质钢种, 硫作为一种有害元素应该被去除, 尤其是对于低碳低硫钢而言, 开发 RH 真空高效脱硫工艺具有重要现实意义。基于脱硫剂添加方法的差异, 将脱硫方式分为投料法^[1]、粉剂顶喷法^[2] (RH-PTB) 和浸没式喷粉法^[3,4] (RH-IJ, RH-BPI)。相较于投料法和粉剂顶喷法, 浸没式喷粉的脱硫效率更高, 脱硫效果更稳定, 这与粉剂的分布行为有关。此外, 循环流量作为 RH 精炼过程中最重要的参数之一, 代表着 RH 工序的冶炼效率。喷粉操作对精炼过程流动行为的影响, 特别是 RH 浸没式喷粉对循环流量的影响很少有报道^[5]。因此, 需要对 RH 浸没式喷粉对循环流量的影响进行更为细致的研究。本文建立了数值模型和物理模型对不同位置的 RH 浸没式喷粉的粉剂分布和循环流量进行了比较。

2. 研究方法

2.1. 物理模型

本文共设置真空室、上升管、下降管和钢包底部四个喷粉位置进行实验。喷枪布置和实验装置如图 1 所示。

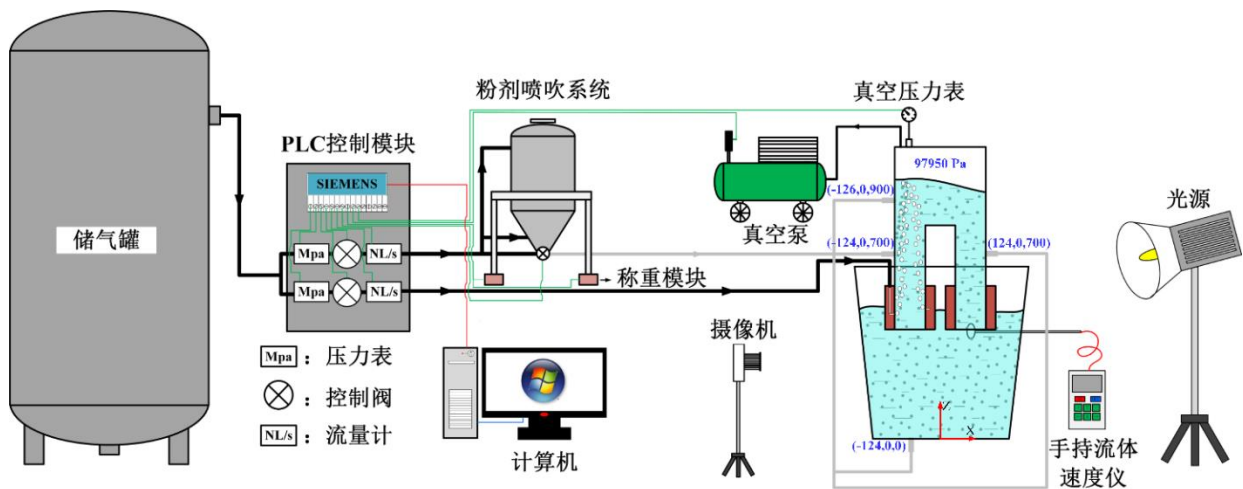


图1 物理模型示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of physical model

本文采用空心二氧化硅小球作为物理模型喷吹的粉剂，平均粒径为 0.025 mm，真密度 400kg/m³。水模型实验中，使用流速计 (LS300-A) 来测量下降管局部的流速。实验过程中，将流速计探头放置下降管中心处，水流冲击涡轮，带动涡轮旋转，仪器自动统计涡轮处水流的速度。摄像机能够瞬时捕捉粉剂在物理模型内的位置用于研究 RH 中粉剂的分布。当装置内流动稳定后，将粉剂喷吹参数输入计算机，计算机和 PLC 间进行通信，开始按照设定的喷粉参数进行喷粉，这将大大减小人工操作造成的误差。摄像机对整个喷粉过程进行拍摄，拍摄频率为 120 fps。其他设置参数见表 1。

表 1 RH（水模型/钢液系统）设置参数

Table 1 RH (water model/liquid steel) experimental parameters

提升气量(NL/min)	载气流量(NL/min)	喷粉速率(kg/min)	喷粉时间(min)
20/1500	11/300	0.02/120	0.5/5

2.2. 数值模型

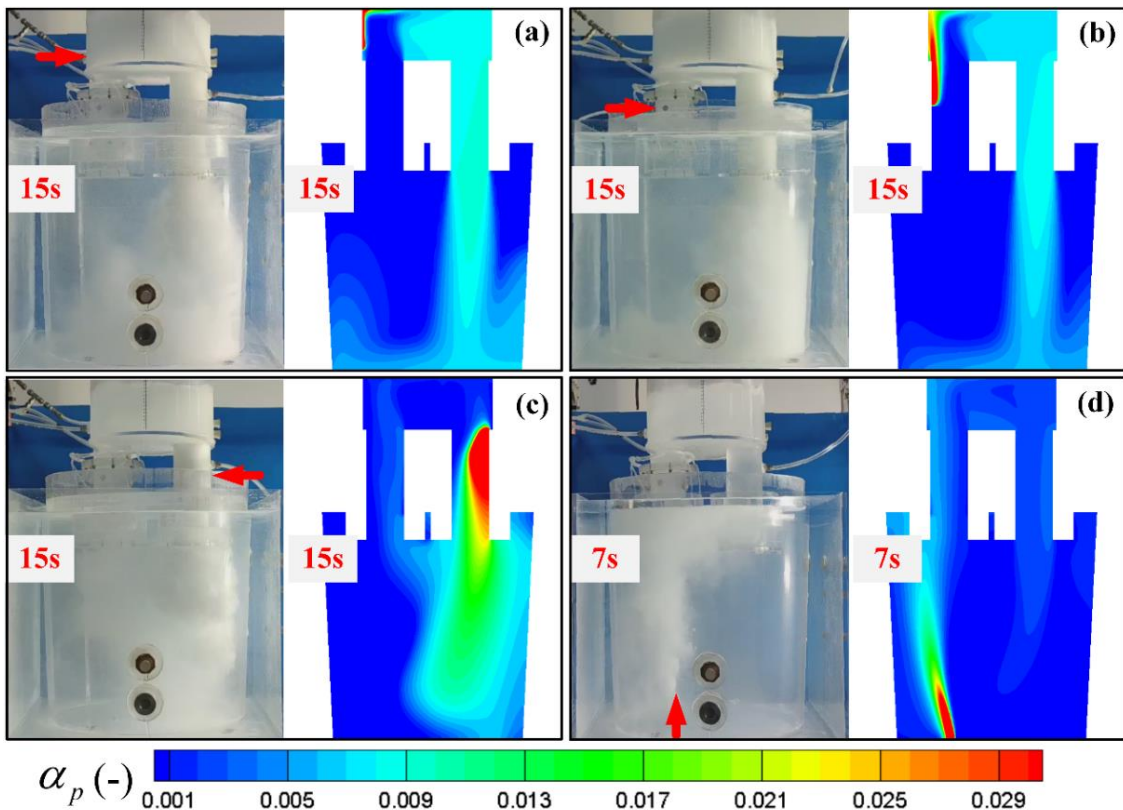
本文建立数值模型的详尽细节已经在我们之前的报道中阐明^[6]，受篇幅限制，在此不在赘述。

3. 结果与分析

3.1. 模型验证

3.1.1. 粉剂分布行为验证

图 2 为四个不同喷粉位置的物理模型和数值模型在相应时刻粉剂分布的比较。数值模型预测的粉剂分布和水模型实验的粉剂分布较为一致。



(a) 真空室喷粉；(b) 上升管喷粉；(c) 下降管喷粉；(d) 钢包底喷粉

图 2 物理模型的粉剂分布和数值模型预测结果比较

Fig.2 Comparison of powder distribution of physical model and numerical model prediction results

3.1.2. 下降管中心速度验证

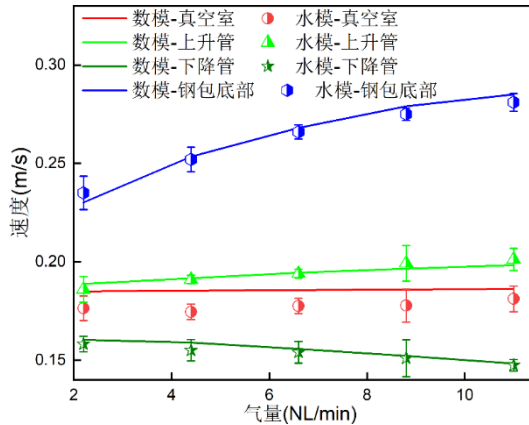


图 3 模型预测和测量值的下降管出口中心处速度比较

Fig.3 Comparison of velocity at the down snorkel outlet center between model predicted and measured values

图 3 中为四种喷粉位置的不同载气流量在下降管截面中心处的速度比较。数值模型预测的速度和水模型实验得到的速度基本吻合。

综上所述,该数值模型能较好的预测 RH 不同浸入式喷粉过程中粉剂的运动分布和熔池内的流动行为。

3.2. 喷粉位置对粉剂分布和钢液循环流量的影响

3.2.1. 喷粉位置对粉剂分布的影响

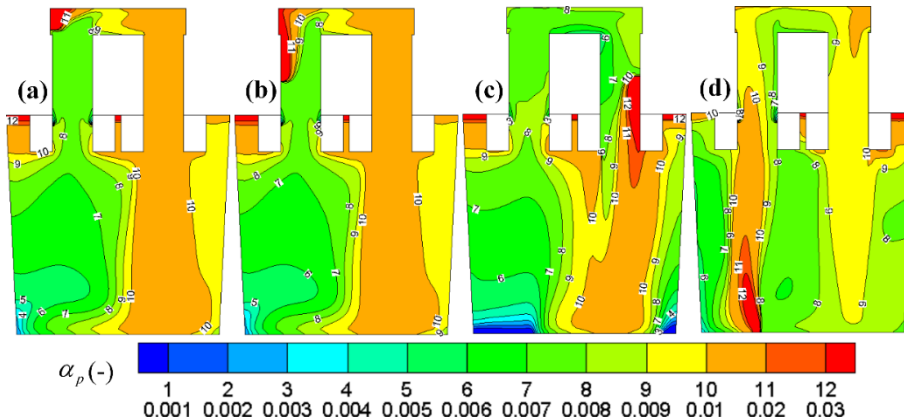


图 4 喷粉位置对粉剂分布的影响: (a) 真空室喷粉; (b) 上升管喷粉; (c) 下降管喷粉; (d) 钢包底喷粉

Fig.4 Effect of powder injection position on powder distribution

图 4 是不同喷粉位置在喷粉载气流量为 300NL/min 和 300s 时刻的粉剂分布。不同喷粉位置对粉剂在熔池的分布产生巨大影响,粉剂出现低浓度区 ($\alpha_p < 0.005$), 本文将这种低浓度粉剂分布区域称为“死区”。真空室喷粉和上升管喷粉的粉剂在熔池内分布相似,如图 4(a), (b) 所示,且高浓度粉剂区域 ($\alpha_p > 0.01$) 面积大于下降管喷粉和钢包底喷粉;钢包底喷粉熔池内粉剂分布比较均匀,几乎不存在“死区”,但是真空室等高湍流区域的粉剂浓度比真空室和上升管喷粉小;下降管喷粉,大浓度粉剂区域较小,并且存在大量“死区”,如图 4(c) 所示。综合考虑喷溅等多因素,上升管位置喷吹位置最优。

3.2.2. 喷粉位置对循环流量的影响

图 5 中是不同喷粉位置对钢液循环流量的影响。真空室喷粉，上升管喷粉可以分别增加 RH 的钢液循环流量 11%和 12.3%；下降管喷粉会降低 36.6%的钢液循环流量。钢包底喷粉对钢液循环流量的增加作用最为显著，达到 22.6%。

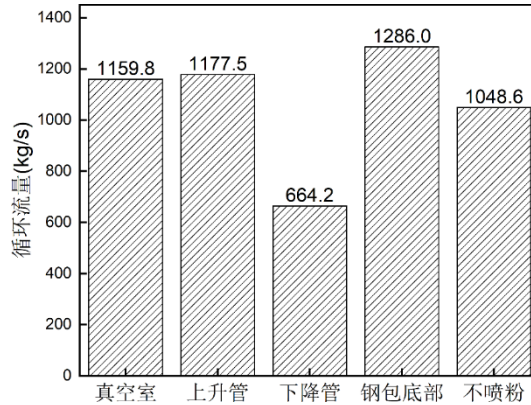


图 5 喷粉对钢液循环流量的影响

Fig.5 The effect of powder injection on the circulation flow rate

4. 结论

(1)不同位置喷粉对粉剂分布有着重要影响。真空室和上升管喷粉粉剂在熔池内的分布行为较为类似；下降管喷粉粉剂在熔池内分布非常不均匀，存在粉剂浓度很低的“死区”；钢包底喷粉粉剂在熔池内真空室等高浓度区域的浓度比较小；综合考虑喷溅等多因素，上升管位置喷吹位置最优。

(2)真空室，上升管喷粉和钢包底喷粉可以分别增加 11.0%，12.3%和 22.6%的循环流量；下降管喷粉会引起循环流量下降 33.6%。

致谢

感谢国家自然科学基金项目（项目号：U20A20272）。

参考文献

- [1] Dai W, Cheng G, Zhang G, et al. Investigation of circulation flow and slag-metal behavior in an industrial single snorkel refining furnace (SSRF): Application to desulfurization[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2020, 51B(2): 611-627.
- [2] Kato. T K K A Y. Behavior of powder in ladle impinged upon molten steel through top lance of vacuum vessel in RH degasser[J]. Tetsu-to-Hagane, 2003, 89(8): 827-832.
- [3] Komai T, Mizukami Y, Iga K, et al. New application of RH degassing technology in ladle metallurgy[J]. Tetsu-to-Hagane, 1983, 69(2): 238-247.
- [4] 朱苗勇, 程中福, 娄文涛, 等. 一种 RH 真空精炼底吹喷粉装置[P]. 2012100127821. [2012-07-11].
- [5] Feng K, Liu A, Dai K, et al. Effect of gas rate and position of powder injection on RH refining process using numerical simulation[J]. Powder Technology, 2017, 314: 649-659.
- [6] 刘壮, 娄文涛, 朱苗勇. RH 侧底喷粉精炼过程流动特性[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(12), 1361-1369.