

· 冶炼与凝固 ·



不同侧吹参数下RH内气液两相循环流动模拟研究

袁建都, 冯亮花, 郭柄君, 王 硕, 水玺琛
(辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051)

摘 要:通过建立包括真空室、浸渍管、钢包的180 t RH气液流动三维物理数学模型,采用VOF两相流模型和应用FLUENT软件进行数值模拟研究了侧吹氩气喷孔布置方式及吹气量对RH内气液两相循环流动的影响。分析了喷气孔单层布置和双层交错布置对喷气流量和上下层间距对上升管出口截面含气率、上升管和下降管出口速度以及循环流量的影响。结果表明,氩气在上升管内贴壁上升,并携带钢液向上运动,沿着运动方向管内截面含气率逐渐增加,在出口截面处含气率达到最大;上升管出口截面含气率越小,上升管出口和下降管出口截面中心速度越大,循环流量越大,均混时间越短;喷气管双层布置、减小间距、增大吹气量,有利于循环流量的提高和均混时间的缩短。

关键词:RH真空精炼; 喷孔布置; 吹气量; 循环流量

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00030 **中图分类号:**TF769. 4

Numerical Simulation Study on Gas-liquid Circulating Flow at Different Side-injecting Conditions in RH Refining System

Yuan Jiandu, Feng Lianghua, Guo Bingjun, Wang Shuo, Shui Xichen
(School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: By establishing three-dimensional physical and mathematical model of gas-liquid flow in 180 t RH including vacuum chamber, immersion tube and ladle, using VOF two-phase flow model and FLUENT software numerical simulation, the influence of side-blown argon nozzle arrangement and gas flow rate on gas-liquid two-phase circulation flow in RH is studied. The effects of jet flow rate and upper and lower spacing on the void fraction of the outlet section of the riser, the outlet velocity of the riser and the downcomer and the circulating flow rate are analyzed as the jet holes arranging in a single layer and in a double-layer staggered arrangement. The results show that argon rises along the wall in the upward tube and carries the molten steel upward. The gas content in the cross section of the tube increases gradually along the direction of movement, and the gas content reaches the maximum at the outlet section. The smaller the void fraction of the outlet section of the riser is, the larger the central velocity of the outlet section of the riser and the outlet section of the downcomer is, the larger the circulating flow is, and the shorter the mixing time is. The double-layer arrangement of the jet pipe, reducing the spacing and increasing the blowing volume are beneficial to the improvement of the circulating flow rate and the shortening of the mixing time.

Key Words: RH Vacuum Refining; Nozzle Layout; Air Blowing Volume; Circulating Flow Rate

RH真空精炼是现代炼钢重要的二次精炼装置之一。RH精炼装置主要是由真空室、上升管、下降管、钢包四大部分组成。精炼过程中,通过真空泵抽真空以及在上升管侧壁喷孔吹入氩气,在压差和气泡驱动的共同作用下,钢液从钢包进入上升管,再进入真空室,在完成脱碳、脱气反应后在重力的作用下从下降管流回钢包,经过反复循环流动来达到温度和成分均匀的目的。

RH内钢液的循环流动状态直接决定了精炼效率,众多研究者就RH内钢液的循环特性开展了大

量的实验和数值模拟研究^[1-2]。Frank Ahrenhold^[3]通过数学物理模拟研究得出氩气流量是影响循环速率的主要因素;Seshadri Varadarajan^[4]通过水模实验得出侧吹气体射流速度以及在液体中行程直接影响循环流量;Deepjyoti Mukherjee等人^[5]通过冷态实验发现喷射气体流量的增加会使循环速率增加、均混时间缩短,但均存在饱和值;李怡宏^[6]通过水模实验分析得出小气体流量集中入射、大气量分散入射有利于循环效率的提高;胡汉涛等人^[7]通过数值模拟研究得出,吹气管内径对于钢液环流量以及钢液

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52074151),辽宁省科学技术厅资助项目(2022 JH2/101300079)

作者简介:袁建都(1993-),男,硕士研究生; **E-mail:**1365871215@qq.com; **收稿日期:**2023-03-03

通讯作者:冯亮花(1974-),女,教授,硕士生导师; **E-mail:**fenglianghua1974@126.com

混合特性的影响远小于气体流量;欧洪林等人^[8]通过建立水模型,得知增加驱动气体流量、增加浸渍管浸入深度、增加浸渍管内径和减少真空室压力,均能增加 RH 钢液的循环流量;艾新港等人^[9]则通过水模实验模拟了增大浸渍管浸入深度对于精炼过程的影响,并得出较大的浸入深度能够改良钢液均匀特性的结论;王晓冬等人^[10]通过数值模拟研究得出,吹氩管分层布置比单层布置更有利于循环流量的提高。

冶炼过程的多相流作用通常发生在气液相界面处,因此,气体弥散程度对于相间的反应存在很大影响^[11-12],因此,有必要从气体运动角度对于气泡行为进行研究。赵定国、佐野正道等人^[13-14]对气泡行为进行了小尺度分析研究后,认为较高压力下气泡的形状更加趋向于正圆形,且气泡数量和气泡密度相应增加,这对于钢液的精炼过程是十分有利的。综合以上分析可知,氩气是 RH 装置的主要动力来源,喷气孔布置及气体的喷射参数对钢液的循环流动及混匀有重要的影响,为提升某钢厂 180 t RH 真空精炼效率,本文建立描述真空室、浸渍管、钢包在内的气液流动三维数学物理模型,通过分析截面含气率、钢液速度、循环流量及均混时间等特征参数,来探索氩气侧吹孔单层布置、双层布置且上下层间距变化时吹气量对钢液循环流量及均混时间的影响规律,为优化氩气侧吹模式及吹气量以改善 RH 内钢液循环特性提供理论指导。

1 研究思路及方案

RH 侧吹气体喷嘴大多采用单层或双层布置方式。张真铭^[15]通过研究发现喷嘴在上下两层交错排列有利于钢液循环效率的提高,韩杰等人^[16]通过研究得出,喷嘴双层布置时,上下层间距大小对循环流量有较大的影响。为探索侧吹气体布置方式及吹气量对循环特性的影响机制,本文以某钢厂 180 t RH 精炼装置为研究对象,分别建立 10 根侧吹管单层布置、上下两层交错布置物理模型,喷气孔布置示意图如图 1 所示,上下层布置间距 d 分别取 0、30、60、90 mm,利用 FLUENT 数值模拟软件计算不同布置方式下的上升管含气率、钢液流速以及钢液环流量随吹气量的变化规律,以得到最有利于 RH 精炼循环的侧吹布置及吹气量。

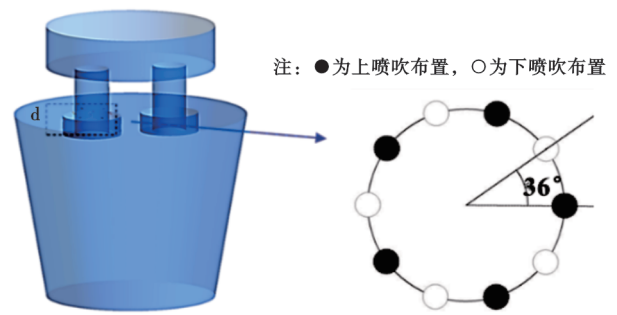


图 1 喷气孔布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of injection nozzle layout

2 数学模型

2.1 控制方程

本文模拟研究不考虑相间化学反应,且氩气和钢液两相分界面明显,因此,多相流控制方程选择 VOF 模型,该方法对于相界面准确模拟已被大量研究证实^[17-19]。

(1) 连续性方程

在本论文研究中以液相作为主相,气相作为第二相,不考虑两相间的质量传递和化学反应,连续方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{m=1}^n \alpha_m = 1 \quad (2)$$

式中,下标 m -相数, α_m 相数- m 相的体积分数, \vec{v}_m - m 相的速度, m/s; ρ_m - m 相密度, kg/m³。

(2) 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \left[\mu \left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) \right] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

$$\rho = \rho_g \alpha_g + \rho_l \alpha_l \quad (4)$$

$$\mu = \mu_g \alpha_g + \mu_l \alpha_l \quad (5)$$

式中, ρ -密度, kg/m³; \vec{v} -速度矢量, m/s; p -压力, Pa; μ -黏度, Pa·s; \vec{g} -重力加速度矢量, m/s²; \vec{F} -表面张力, N/m³, 下标 g -气相, l -液相。

2.2 物理模型及网格划分

以某钢厂 180 t RH 精炼装置为研究对象,真空室直径、高度分别为 2.8、5.125 m,浸渍管直径、高度、浸入深度分别为 0.56、1.595、0.45 m,钢包底部直径、上口直径、高度分别为 2.8、3.864、4.415 m,喷孔数为 10,建立 1:1 物理模型,用四面体网格和六面体网格共同对模型进行划分,喷嘴入口部位进行网格

加密,网格划分结果如图2所示。以下降管出口流量作为对比参数,选择网格数为60万、95万及125万进行网格的独立性测试,结果如图3所示,可以看出网格数量达95万与125万的计算结果相差不大,因此,考虑到计算效率问题,对网格适当加密后选择网格总数约97万。

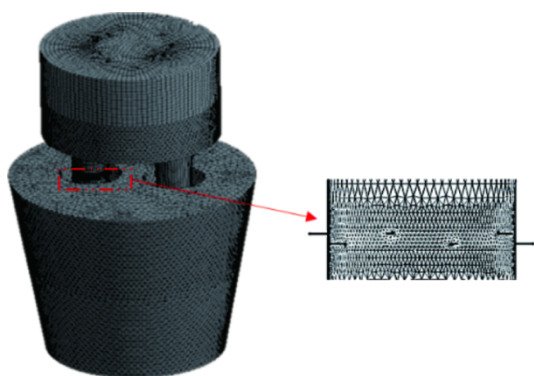


图2 模型网格划分
Fig. 2 Model grid division

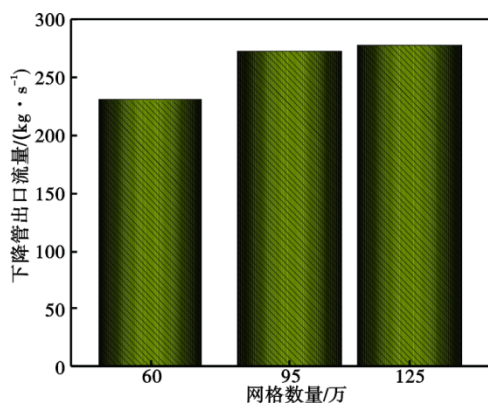


图3 网格无关性检验
Fig. 3 Grid independence test

2.3 边界条件及模型验证

基于以上物理模型,将侧吹管氩气入口设为质量入口条件,入口处钢液和空气的质量流量及体积分数均设置为0,氩气质量流量根据模拟工况进行换算,体积分数设为1;将真空室顶部设置为压力出口,采用 pressure-outlet 类型,氩气在钢液表面逸出后通过该边界流出;将模型所有壁面均设置为无滑移边界条件。

为了验证数学模型可靠性,本文将模拟计算的下降管出口钢液流量与稳定真空度下循环流量(Q)经验计算公式(6)^[20]进行对比,侧吹气量为80、120、150 Nm³/h时,循环流量模拟计算结果与经验公式计

算结果分别为246、297、318 kg/s及255、300、322 kg/s,误差均在5%之内,说明数学模型计算结果合理可靠。

$$Q = \beta H^{1/3} G^{1/3} D^{4/3} \quad (6)$$

式中: β -比例系数,取值为17.22; H -气体喷吹深度,m; G -驱动气体流量,NL/min; D -插入管内径,m。

3 分析与讨论

基于以上数学物理模型,采用FLUENT模拟软件,模拟计算侧吹管单层布置及上下两层错列布置,间距 d 分别取0、30、60、90 mm,氩气流量分别为120、130、150 Nm³/h十二个工况下的上升管截面含气率、钢液速度以及对应的钢液循环流量,分析喷气孔布置及吹气量变化对循环流量的影响规律。

3.1 RH内气液两相流特征分析

图4为侧吹喷嘴单层均匀布置、吹气流量为120 Nm³/h时气相运动轨迹及上升管不同部位截面处的气相分布云图。由图4可见,氩气进入上升管后,穿透深度很小,气体沿着上升管侧壁上升,是为侧管喷吹的“贴壁效应”。图4中左侧为上升管三个位置处的气相分布云图,可以看出,十个喷口位置处气相体积均匀,在上升的过程中,由于气泡所受静压力减小,气体体积膨胀,沿着气泡运动方向上升,管内的截面含气率增加,在浮力的作用下,气体最终在真空室自由表面逸出。

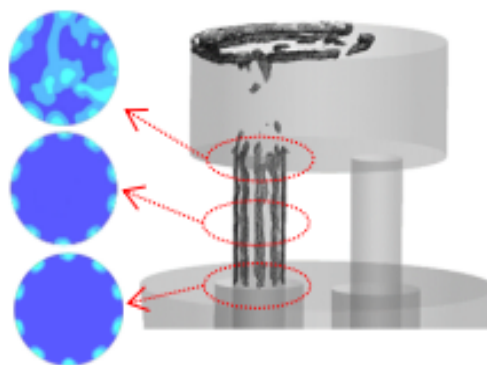


图4 上升管内气相运动及分布
Fig. 4 Argon phase movement and distribution in up-leg tube

图5为RH整个装置不同截面位置的钢液速度矢量图。综合各截面流场结果可知:下降管前后及左右的钢液随着上升管内气泡向上运动不断汇入上升管进入真空室,由于速度的急剧变化,在上升管与真空室的接口部位以及真空室内形成涡流,钢液由真空室经下降管流入钢包,之后再次进入上升

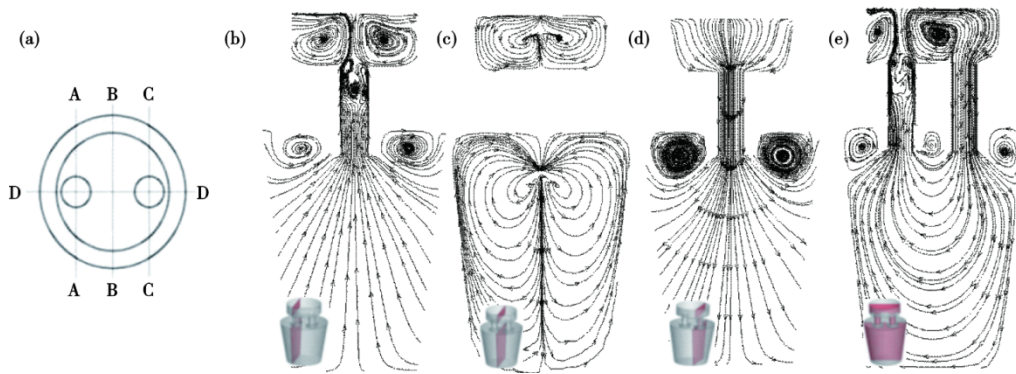


图 5 不同截面位置钢液速度矢量图: (a)截面位置示意图, (b)A-A 截面, (c)B-B 截面, (d)C-C 截面, (e)D-D 截面

Fig. 5 Velocity vector diagram of steel liquid at different section locations : (a) Schematic diagram of section location, (b) A-A section, (c) B-B section, (d) C-C section, (e) D-D section

管;钢包内的钢液进入上升管及流出下降管时在其周围均产生涡流,但钢包内部回流较弱,钢液由下降管进入上升管时部分流体的流程较短,吹气流量为 120 Nm³/h 条件下,钢包内未形成强烈的搅拌回流。

3.2 喷气孔布置及吹气量对上升管截面含气率的影响

脱碳和夹杂物的去除过程以及精炼效率的高低均与气液两相区的含气率分布有很大关系。因此,合理描述 RH 上升管侧吹气体行为和含气率分布非常重要。

通过 Tecplot 后处理软件对流场稳定后位于上升管 4.5、5.0、5.5 m 三个位置的气相组分云图在 0.1、0.2、0.3 s 时进行获取,后续利用 Matlab 软件进行图像处理的相关编程,对所得上升管气相云图进行二值转换后,通过程序计算所得平均气相区域面积数据进行面积占比计算分析。

计算结果如图 6 所示,图 6(a) d=0 mm 为十个喷气孔单层布置计算结果,其余为喷气孔双层布置,但上下间层间距不同时计算结果对比。由图 6 可知,喷气孔单层布置时,上升管进口处的截面含气

率随着吹气量增加而增加;双层布置且间距为 30 mm 时,上升管各处截面含气率受吹气量影响较大,而间距为 60 mm 和 90 mm 时,吹气量对上升管内截面含气率影响较小。喷嘴布置模式及吹气量相同时,上升管出口(即进入真空室的位置)截面含气率最大,喷气孔布置不同时,该位置截面含气率达到最高值时对应的吹气量不同。喷孔单层布置时,吹气量为 150 Nm³/h 时,上升管出口截面含气率最高为 43%。喷孔双层布置,间距 d 为 30、60、90 mm,上升管出口截面含气率最高值及对应的吹气量分别为: 48%, 120 Nm³/h; 35%, 135 Nm³/h; 36%, 125 Nm³/h。分析其原因在于:单层布置时,吹气量的增加使气泡直径及穿透深度增加,故在大气量下,上升管出口截面含气率高。

3.3 喷气孔布置及吹气量对上升管截面出口速度的影响

对于钢液运动的分析主要集中于钢液在不同侧吹工况下的钢液流场分布形式。由于 RH 精炼装置的真空室以及钢包部分在结构上都有一定的对称性,因此,选取如图 7 所示的截面作为观测位置进行钢液流场的对比分析,可以定性得出在精炼过程

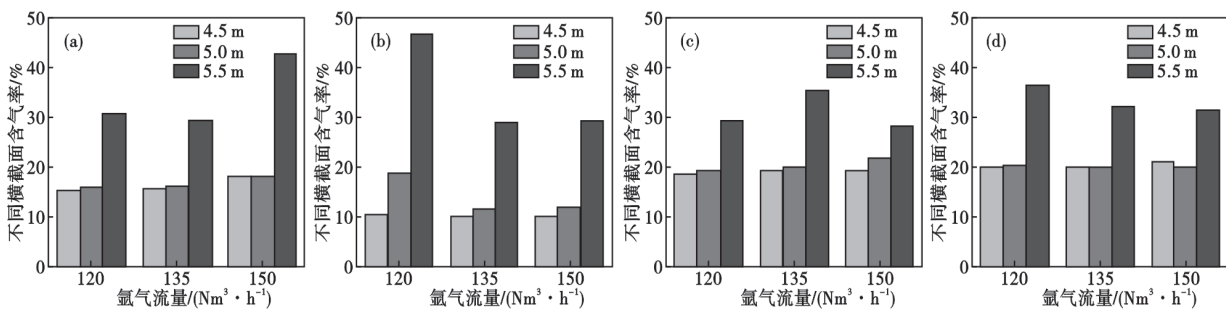


图 6 上升管不同位置截面含气率对比: (a) d=0 mm, (b) d=30 mm, (c) d=60 mm, (d) d=90 mm

Fig. 6 Comparison of gas content at different position of up-leg tube : (a) d=0 mm, (b) d=30 mm, (c) d=60 mm, (d) d=90 mm

中气液相互作用下钢液的运动规律。

在不同喷嘴间距及侧吹流量(从左到右依次为 120、135、150 Nm³/h)下,上升管中心的纵向截面的流场如图 7 所示,由图 7 分析可以得到:钢液经上升管由钢包进入真空室,是一个流动截面发生突变的过程,伴随着这种较高流速,钢液发生渐缩和渐扩流动,而产生若干旋涡,由于精炼装置的对称性,旋涡位置也大致对称,调整喷嘴间距以及侧吹气量并不会改变截面流场的这一特性。

由截面含气率分析可知,同一工况下上升管出口截面的含气率最大,为明确不同工况下气体对钢液的抽吸能力,整理不同工况下的上升管出口截面速度,如图 8 所示。图 8(a)为喷气孔双层布置,且上下层间距 d=30 mm 上升管出口截面速度分布,由图可见:上升管出口截面速度两侧高,中间低,呈现不对称的“M”形,同截面含气率变化规律相反,吹气量越大,上升管出口中心处的钢液速度越大,吹气量

为 150 Nm³/h 时,中心处的速度为 0.2 m/s,而吹气量为 120 Nm³/h 时,上升管中心速度仅为 0.1 m/s。由此可知,喷气孔双层布置小间距下,吹气量增加,上升管内湍流强度增加,强化了对钢液的抽吸。图 8(b)是层间距 d 分别为 0、60、90 mm 时上升管出口截面处钢液速度分布,速度分布成两侧高中间低的“M”形,但管中心两侧速度近似对称;喷气孔单层布置,吹气量为 120 Nm³/h,以及双层布置且上下层间距为 60 mm,吹气量为 150 Nm³/h 时,上升管出口截面处中心速度较高,最高为 0.20 m/s,对钢液的抽吸能力较强;其余几种情况下,上升管出口截面中心速度均小于 0.2 m/s,对钢液的抽吸能力较弱。综合喷气孔单层布置及双层小间距布置可知,上升管出口截面含气率越高,钢液速度越小,对钢液的抽吸能力越弱。

3.4 喷气孔布置及吹气量对循环流量的影响

在 RH 精炼过程中,循环流量对精炼效率至关

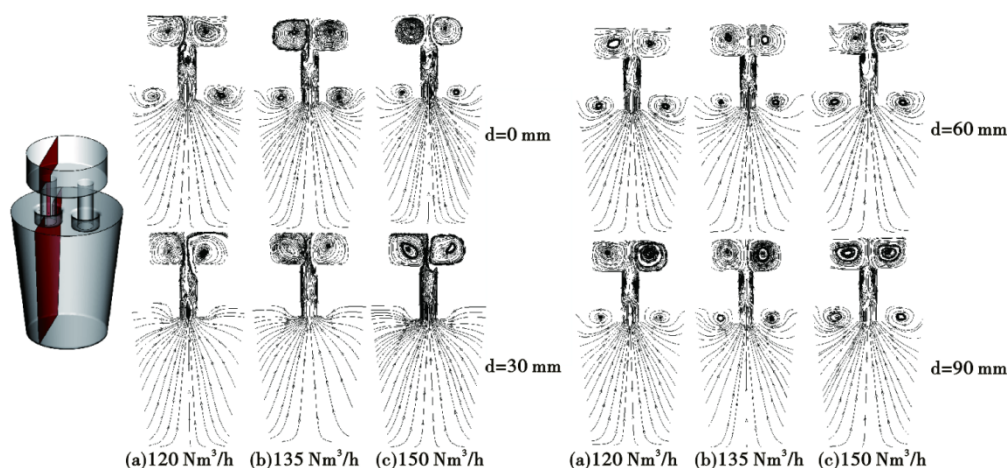


图 7 上升管纵向截面的流场图

Fig. 7 Flow field diagram of longitudinal section of the up-leg tube

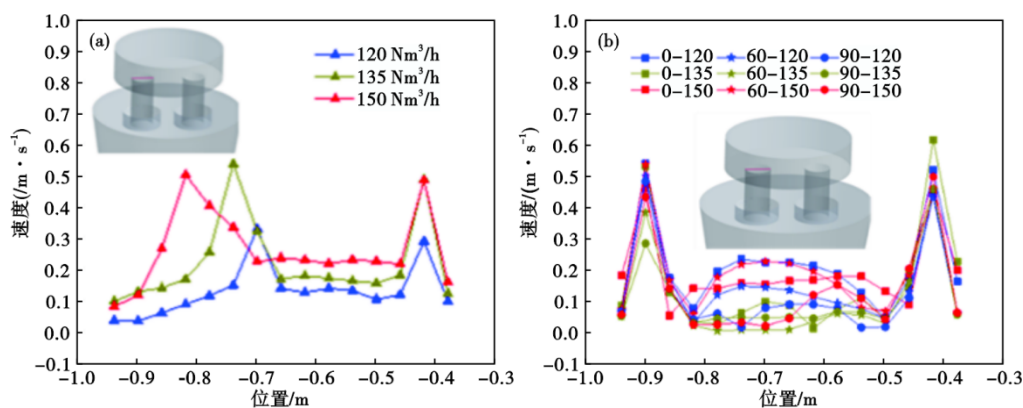


图 8 上升管出口截面速度分布:(a)d=30 mm, (b)d=0、60、90 mm

Fig. 8 Outlet section velocity distribution of up-leg tube: (a) d=30 mm; (b) d=0, 60, 90 mm

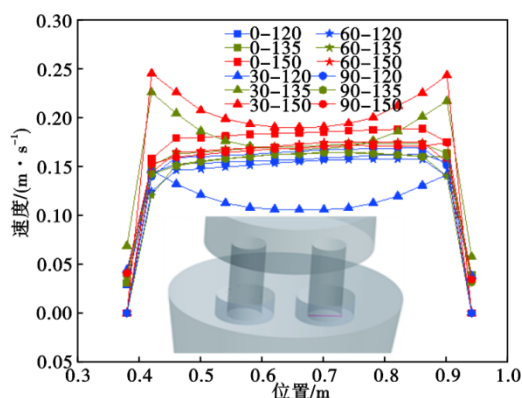


图9 下降管出口速度分布

Fig. 9 Outlet velocity distribution of down-leg tube

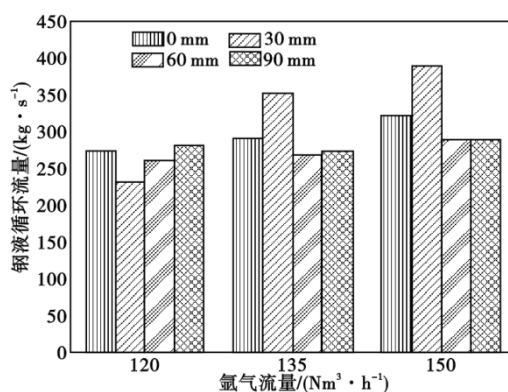


图10 不同工况下钢液循环流量

Fig. 10 Circulation molten steel flow rate at different conditions

重要。本文基于下降管出口截面中心速度的计算分析,结合流量计算公式来获得不同工况下钢液的循环流量,结果如图9及图10所示。由图9可知,下降管出口截面速度呈现两侧高中间低的形式,与上升管出口截面不同的是,出口截面中心速度成倒“U”型。喷气孔双层布置且上下层间距为30 mm,吹气量为120 Nm³/h时,下降管出口截面中心速度最小;而喷气孔单层布置,吹气量为150 Nm³/h,以及喷气孔双层布置且上下层间距为30 mm,吹气量为150 Nm³/h时,下降管出口截面中心速度较高,为0.2 m/s左右;其余工况下,下降管出口截面中心速度为0.15 m/s左右。由图10可知,与下降管出口速度分布相对应,出口速度大,循环流量亦大,最大为387 kg/s;在同一喷气孔布置方式下,循环流量随吹气量的增加而增加,但喷嘴双层布置间距为60 mm和90 mm时的循环流量均小于单层布置时的值,且随吹气量增加而增加的幅度较小。综合分析可得出,吹气量是决定循环流量的关键因素,在大吹气量下,喷气孔小间距双层布置的循环流量高于单层布置;当吹气量为150 Nm³/h时,喷气孔双层布置且间距为30 mm的布置方式对应的循环流量比单层布置高出近21%。因此,为获得较大的循环流量,喷气孔采取双层布置且间距为30 mm,吹气流量采取150 Nm³/h较为合适。

3.5 均混时间分析

RH精炼技术的目的是通过搅拌来均匀钢液的温度和成分,因此,均混时间是衡量钢液搅拌效果的关键参数。为评价上述最大循环流量对应工况下钢包内钢液的搅拌效果,本文基于数值计算获得稳定的多相流场后,在钢包内加入示踪剂,通过组分运输模型来计算示踪剂在钢液中的扩散过程,当

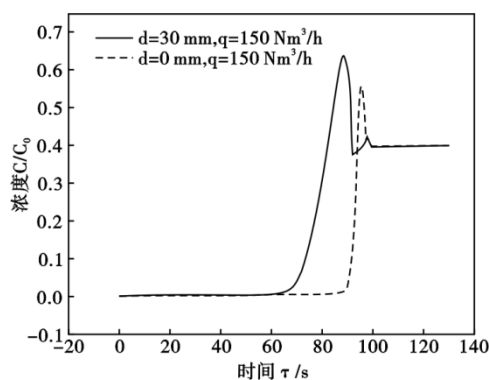


图11 均混时间对比

Fig. 11 Mixing time comparison

下降管出口位置示踪剂浓度达到稳定时的时间记为均混时间,结果如图11所示。

由图11可知,下降管出口处示踪剂的浓度先增加后降低,之后达到稳定,喷气孔单层和双层布置时示踪剂达到稳定的时间分别为95 s和82 s,进一步说明,小间距双层布置大喷气量的情况下能够提高循环流量,缩短均混时间,有利于钢液成分和温度的均匀。

4 结论

(1)侧吹氩气进入上升管后贴着管壁上升,沿着流动方向,上升管内截面含气率增加,在出口处达到最大;在侧吹气体的驱动下,钢液由钢包进入上升管经真空室进入下降管,形成循环流动,吹气量较小时,钢液流程短循环较弱。

(2)喷气孔单层布置时,上升管出口截面含气率在大吹气量下达到最高值,在小吹气量下,钢液速度在出口截面中心处达到最大值;喷气孔双层布置时,上升管出口截面含气率在小间距小吹气量下

达到最高值,在大吹气量下,钢液速度在出口截面中心处达到最大值;上升管出口截面含气率越高,出口截面中心处的钢液速度越小,对钢液抽吸能力越弱。

(3)吹气量为 $150 \text{ Nm}^3/\text{h}$,喷气孔单层布置以及喷气孔双层布置且上下层间距为 30 mm 时,下降管出口截面中心速度及循环流量都较大,喷气孔小间

距双层布置的循环流量高出单层布置近21%;喷气孔单层布置的均混时间为 95 s ,小间距双层布置的均混时间为 82 s ,小间距双层布置比单层布置的均混时间缩短 13 s 。因此,为获得较大的循环流量和精炼效率,喷气孔可选择上下层小间距的双层布置,且选用大吹气量来实现。

参考文献

- [1] 刘畅,李树森,张立峰. RH精炼过程中气液两相流动及混匀现象的模拟研究[J]. 金属学报,2018,54(2):347-356.
- [2] 郑万,贺志鹏,李光强,等. RH喷吹参数对循环流量和均混时间影响的物理模拟[J]. 钢铁研究学报,2017,29(5):373-381.
- [3] Ahrenhold . F, Pluschkell . W . Circulation rate of liquid steel in RH degassers[J]. Steel Research, 1998, 69(2): 54-59.
- [4] Varadarajan . S , Sérgio . D , Luiz . C. Cold model studies of RH degassing process[J]. The Iron and Steel Institute of Japan, 1986, 26(2):133-138.
- [5] Mukherjee . D , Kumar Shukla . A , Dieter G. Senk. Cold model-based investigations to study the effects of operational and nonoperational parameters on the Ruhrstahl-Heraeus degassing process [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(2): 763-771.
- [6] 李怡宏. RH快速脱碳技术及环流反应器内流体行为研究[D]. 北京:北京科技大学,2015.
- [7] 胡汉涛,魏季和,黄会发,等. 吹气管内径对RH精炼过程钢液流动和混合特性的影响[J]. 特殊钢,2004,25(5):9-11.
- [8] 欧洪林,包燕平,岳峰,等. RH真空精炼过程循环流量的水模型研究[J]. 特殊钢,2011,32(3):9-11.
- [9] 艾新港,包燕平,吴华杰,等. RH精炼循环流量优化的水模型研究[J]. 特殊钢,2009,30(3):1-3.
- [10] 王晓冬,王维娜. RH真空精炼吹氩参数对循环流动影响的数值分析[J]. 真空科学与技术学报,2009,29(6):682-685.
- [11] Zhang . L F , Aoki . J , Brian . G , et al. Inclusion removal by bubble flotation in a continuous casting mold [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2006, 37(3):361-379.
- [12] Zhang . L F , Li Fei . Investigation on the fluid flow and mixing phenomena in a Ruhrstahl-Heraeus (RH) steel degasser using physical modeling[J]. ZOM,2014, 66(7): 1227-1240.
- [13] 赵定国,郭福建,王书桓,等. 高压底吹条件下钢液中气泡的物理模拟[J]. 钢铁钒钛,2016, 37(2): 108-112.
- [14] 佐野正道. 熔融金属中ガス吹込みにおける気泡の分散[J]. 鉄鋼, 1979, 65(8): 1140-1148.
- [15] 张真铭. 120吨RH精炼炉工艺优化研究[D]. 赣州:江西理工大学,2017.
- [16] 韩杰,王晓冬,巴德纯,等. RH真空精炼吹氩喷嘴结构参数对循环流量影响的数值模拟[J]. 真空,2013,50(5):41-44.
- [17] 解茂昭,宋会玲,刘红,等. 单个气泡在液态金属搅拌流场中运动与变形的数值模拟[J]. 热科学与技术,2007,6(2): 146-151.
- [18] 马斗. 单孔气泡动力学行为的VOF数值模拟[D]. 天津:天津大学,2009.
- [19] 赵凯岚. 单个气泡在金属熔体自由表面行为的数值模拟[D]. 大连:大连理工大学,2010.
- [20] 区铁,刘建功,张捷宇,等. RH法钢水定向循环流量操作模型的研究[J]. 金属学报,1999,35(4):411-415.