



底吹气泡运动行为及其对混匀影响的水模实验

杜亭辉¹, 冯亮花¹, 吴明涛¹, 康小兵²

(1 辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051; 2 河北燕山钢铁集团有限公司, 迁安 064400)

摘要:建立底吹金属熔池水模实验平台,采用高速摄影技术及图像处理手段,分析了狭缝宽度和底吹流量对气泡的大小、数量、速度、受力的影响规律;通过测量溶液内电导率的变化来反映溶液的混匀情况,明确底吹结构和参数对溶液的搅拌强度。结果表明,气泡运动主要受浮力和曳力的影响,气泡的索特直径随狭缝宽度、底吹流量的增大而增大,气泡越大越有利于溶液搅拌,从而缩短混匀时间,而气泡数量的变化趋势则与之相反;气泡上升速度与底吹流量成正比,与狭缝宽度成反比;结果表明,当狭缝宽度为 0.30 mm,底吹流量为 1.00 L/min 时,混匀时间最短。

关键词:水模实验;狭缝宽度;底吹流量;气泡运动;混匀时间

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00256 中图分类号:TF715.1

Water Model Experiment of Bottom Blown Bubble Movement Behavior and its Effect on Mixing Uniformity

Du Tinghui¹, Feng Lianghua¹, Wu Mingtao¹, Kang Xiaobing²

(1 School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;
2 Hebei Yanshan Iron and Steel Group Co., Ltd., qianan 064400, China)

Abstract: The effects of slit width and flow rate on the size, quantity, velocity and force of bubbles are analyzed by establishing an experimental platform of bottom blown metal molten pool water model and using high-speed photography and image processing methods. The mixing condition of the solution was reflected by measuring the change of the electrical conductivity in the solution, so as to determine the stirring intensity of the solution by the structure and parameters of the bottom blowing. The results show that the bubble movement is mainly affected by the buoyancy and drag force, and the Sauter diameter of the bubble increases with the increase of the slit width and the bottom blowing flow rate. The larger the bubble, the more favorable the stirring of the solution and the shortening of the mixing time, while the change trend of the bubble number is opposite. The rising speed of the bubble is proportional to the bottom blowing flow rate and inversely proportional to the slit width. The experiment results show that when the slit width is 0.30 mm and the bottom blowing flow rate is 1.00 L/min, the mixing uniform time is the shortest.

Key Words: Water Model Experiment; Slit Width; Bottom Blow Flow Rate; Bubble Motion; Mixing Uniform Time

在钢铁冶金过程中,气泡是熔池内各种脱磷、脱硫反应以及成分混匀的主要驱动力,明确气泡在溶液中的运动、受力及其影响因素,对优化喷吹结构和参数以提高冶炼效率具有重要意义。缝隙式透气砖因具有透气性能好、气体输送过程中阻力小、气量调节范围宽等特点,广泛应用于炼钢底吹工艺中^[1-2]。何平等^[3]基于水模实验研究发现,气体由狭缝型透气砖进入液体时生成的气泡直径较大,液体的混匀程度较好;潘时松^[4]基于水模实验的研究,得到了能有效缩短熔池混匀时间的最佳狭缝宽度。除透气砖的结构参数外,底吹气体流量对气泡的生成、熔池的混匀程度有重要的影响。Zhou Xiao-

bin^[5]基于转炉底吹水模实验研究发现,溶液混匀时间随底吹流量的增大而减小;Raymond等^[6]基于气液两相流数值模拟研究得出,底吹流量对气泡的上升速度、加速度有决定性的影响;徐玲君等^[7-12]通过研究气泡在水中的运动行为,发现气泡速度和气泡的大小相关;汪成义等^[13]通过 210 t 转炉底吹流量对熔池的混匀效果进行数值模拟研究,得出底吹流量越大,熔池混匀时间越短;薛瑞等^[14]通过数值模拟得出,底吹流量增加,熔池死区比例减少,熔池混匀时间短;杨宇等^[15-16]采用水模实验和数值模拟的方法,对底吹钢包熔池混匀效率研究发现,底吹流量对于提高熔池的混匀效率有一个最佳值。

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:杜亭辉(1999—),男,硕士; E-mail:1692903358@qq.com; 收稿日期:2023-12-18

通信作者:冯亮花(1974—),女,博士,教授; E-mail:fenglianghua1974@126.com

综上所述,透气砖是钢铁冶金炉底吹炼的关键部件,其结构及喷吹气体流量是决定熔池内气泡尺寸及运动行为,进而影响熔池液体运动、混匀的重要因素。为此,通过水力学模拟实验,来探讨狭缝宽度和底吹流量对气泡运动及溶液混匀时间的影响,通过高速摄影机拍摄和图像处理手段^[17-18],得出气泡当量直径,分析索特直径、气泡速度、受力变化规律;通过分析溶液的电导率来确定不同工况下的混匀时间,以考察气体对液体的搅拌强度。从而,可明确气泡生成及运动行为,对底吹透气砖的优化设计以实现高效吹炼有重要的指导意义。

1 实验设备及方法

1.1 实验设备

研究使用的水模实验系统如图1所示,由供气系统、水槽、电导仪测试系统及高速摄像系统组成,其中,0.5倍水槽直径处对称布置4个底吹元件^[19],水槽高为765.4 mm,水槽底部半径为315.4 mm。

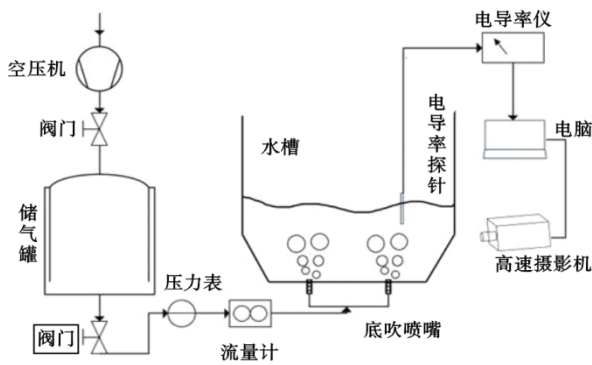


图1 水模型实验装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of water model experimental device

1.2 气泡上升速度

采用CMOS高速摄影机系统采集底吹气流产生的气泡在水槽当中的运动情况,利用图像处理对采集到的图像数据进行分析。提取气泡的几何特征参数,包括气泡轮廓的长短轴、质心等,以得到当量直径;对一帧图像内的气泡个数进行计数,每间隔0.5 s取1帧图像,取平均值得到气泡个数。统计所有气泡个数及所有气泡的当量直径来求得气泡的索特直径^[20]。当量直径和索特直径计算公式分别如式(1)和(2)所示。

$$d_b = \sqrt[3]{a^2 \cdot b} \quad (1)$$

$$d_{32} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \quad (2)$$

式中, d_b 为气泡当量直径; a 和 b 分别代表气泡的长轴和短轴,mm; d_{32} 为气泡群索特直径,mm; d_i 是第 n_i 个气泡直径; n_i 为气泡直径 d_i 个数。

由于拍摄视野较小,不能使用高速摄像机对气泡从产生到气液界面的全程运动过程进行拍摄,因此,在距槽底50 mm、100 mm、150 mm三个位置分别对气泡进行拍摄,取平均值计为对应的索特直径。

整理气泡的质心位置后,根据气泡完整运动路线及运动时间得出气泡在该拍摄区域的速度。假设气泡刚进入视野时其质点坐标为 (x_i, y_i) ,离开视野时其质点坐标为 (x_{i+1}, y_{i+1}) ,气泡从进入视野到离开视野共间隔 z 张照片,则该气泡平均速度可由式(3)求得。

$$\mu = \frac{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}{0.001z} \quad (3)$$

在三个位置处分别对气泡进行拍摄,每个工况共捕捉100个左右的气泡,取其平均值代表该工况下气泡的平均运动速度。

1.3 气泡受力

底吹气泡在上升过程中会受到多种力的作用,例如浮力、重力、附加质量力、曳力等,而浮力和曳力在这些力当中起主导作用,在很大程度上会决定气泡的运动状态。气泡所受浮力、重力、曳力、附加质量力分别如式(4)(5)(6)(7)所示。

$$F_g = \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_l - \rho_d) g \quad (4)$$

$$F_c = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho_d g \quad (5)$$

$$F_A = -\rho_l C_{AM} \frac{\pi}{6} d^3 \frac{du}{dt} \quad (6)$$

$$F_D = -\frac{1}{2} \rho_l C_D \frac{\pi}{4} d^2 u^2 \quad (7)$$

式中, d 、 ρ_l 、 ρ_d 、 C_D 、 C_{AM} 、 u 、 t 分别代表气泡当量直径、流体密度、气泡密度、曳力系数、附加质量系数、速度和时间。

1.4 混匀时间

按照实验方案设计值向水槽供气,通过导管往溶液内分三次注入100 ml的NaCl溶液。电导率^[21]采集系统监测溶液内电导率变化,取电导率值波动范围不超过稳定值5%时的时间为混匀时间,取三次稳定时间平均值,即为该工况下的混匀时间。改变狭缝宽度和底吹流量,探究各工况下溶液的混匀时间变化规律。

2 实验参数及方案

本实验采用狭缝式透气砖,结构如图2所示。

其直径 D 为 10 mm, 周围分布 10 条狭缝, 其宽度 d 分别为 0.15、0.20、0.25、0.30 mm 四种狭缝型透气砖, 对应的透气面积及透气率见表 1。

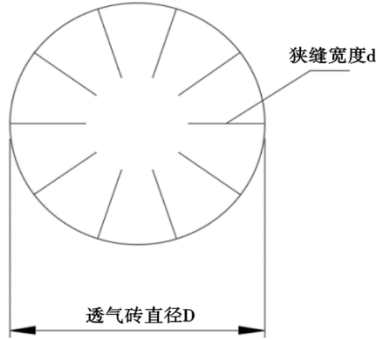


图2 透气砖结构图

Fig. 2 Structure drawing of breathable brick

表1 四种狭缝参数
Table 1 Four slit parameters

序号	条宽/mm	透气面积/m ²	透气率/%
1	0.15	4.5×10 ⁻⁶	5.73
2	0.20	6×10 ⁻⁶	7.64
3	0.25	7.5×10 ⁻⁶	9.55
4	0.30	9×10 ⁻⁶	11.46

实验气源为空气, 液体为水, 液面高度为 200 mm, 在 0.50、0.75、1.00 L/min 三种底吹流量下进行研究。

3 实验结果及分析

图 3 中左图为实验拍摄的气泡在溶液中运动及分布图, 经图像处理得出气泡轮廓如图 3 中右图所示。在得到气泡的运动图像后, 根据式(1)~(3)可计算得到气泡的索特直径以及气泡的运动速度; 将气泡的速度值代入式(4)~(7)可计算得到气泡的受力情况, 进而分析气泡的运动行为。

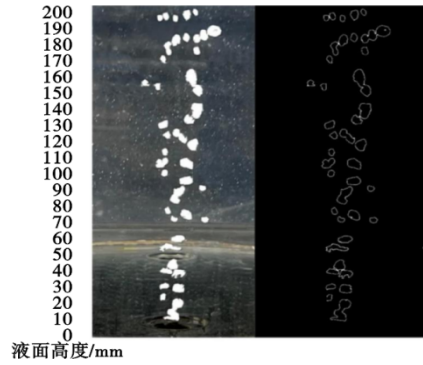


图3 底吹气泡运动图像

Fig. 3 Bottom blown bubble motion image

3.1 狭缝宽度和底吹流量对气泡形态的影响

当底吹狭缝宽度与流量发生变化时, 气泡在上升过程中其形状大小、速度、加速度等均随之发生变化。图 4 为气泡当量直径占比在不同底吹流量随狭缝宽度的变化曲线。由图 4 可知, 气泡当量直径呈现两边低中间高的分布形式, 随着底吹流量的增加, 最高占比对应气泡当量直径及跨度增加; 底吹流量小, 以小气泡为主; 底吹流量越大, 以大气泡为主, 且分布越趋于均匀。狭缝宽度为 0.25 mm, 底吹流量为 0.50 L/min 时, 液体中以当量直径为 4~6 mm 气泡为主; 当底吹流量增加至 1.00 L/min 后, 液体中以当量直径为 10~12 mm 气泡为主。在同一底吹流量下, 占比较多气泡当量直径及直径跨度的占比区域随着底吹狭缝宽度增加而增加, 气泡直径分布也趋于均匀。

统计液体中气泡个数及当量直径, 计算不同工况下的索特直径, 结果分布如图 5、图 6 所示。由图 5 可知, 气泡个数随着狭缝宽度和底吹流量的增加而减少; 狭缝越窄, 气泡个数随流量的增加而减小的幅度越大; 狭缝宽度越大, 气泡个数受底吹流量的影响越小。由图 6 可知, 与气泡个数变化规律相反, 气泡索特直径随狭缝宽度和底吹流量的增加而增大, 但底吹流量越

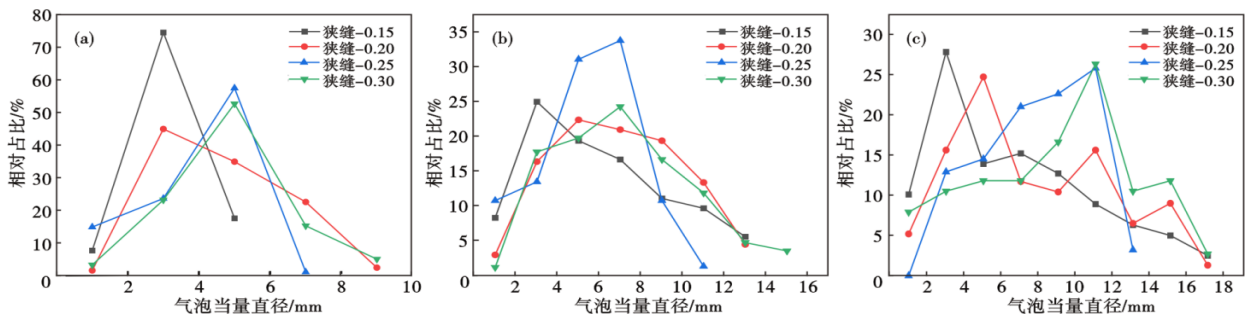


图4 气泡的当量直径占比随底吹流量和狭缝宽度变化: (a)0.50 L/min, (b)0.75 L/min, (c)1.00 L/min

Fig. 4 The equivalent diameter of the bubble varies with the bottom blow flow rate and slit width (a)0.50 L/min; (b)0.75 L/min; (c)1.00 L/min

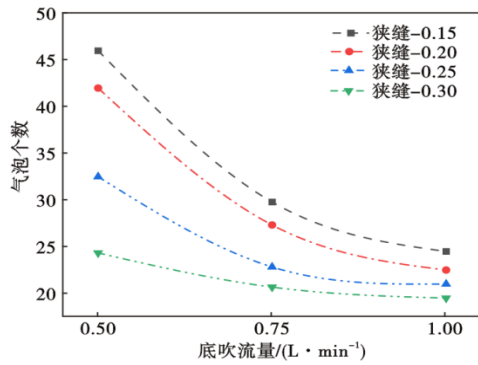


图 5 气泡个数在不同工况下的变化

Fig. 5 The change of the number of bubbles under different working conditions

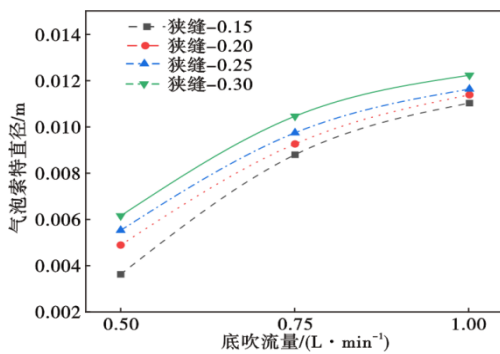


图 6 气泡索特直径变化趋势

Fig. 6 Variation trend of bubble Sauter diameter

大,狭缝宽度对索特直径的影响程度减小。如在底吹流量为 0.50 L/min 时,狭缝宽度变化引起索特直径与其平均值之间的偏差为 18.6%,而当底吹流量增长至 1.00 L/min 后,索特直径与其平均值之间偏差缩小为 3.8%。同一流量下,狭缝变宽对气泡索特直径影响较大,如在底吹流量为 1.00 L/min 时,狭缝宽为 0.25 mm 与 0.20 mm 之间气泡索特直径相差 0.25 mm,而狭缝 0.30 mm 与 0.25 mm 之间的差距则增加至 0.6 mm。

3.2 狭缝宽度和底吹流量对气泡上升速度的影响

对各工况下气泡的平均上升速度进行统计,结

果如图 7 所示。由图 7 可知,本实验条件下,气泡平均上升速度范围为 0.23~0.30 m/s,气泡平均上升速度与底吹流量成正比,与狭缝宽度成反比。当底吹流量增加时,气泡脱离底吹透气砖速度加快,以较大的动能进入液体,因此,气泡在液体中以较大速度运动。而底吹流量相同时,狭缝越窄,气泡脱离狭缝透气砖的速度越大,平均上升速度变大。

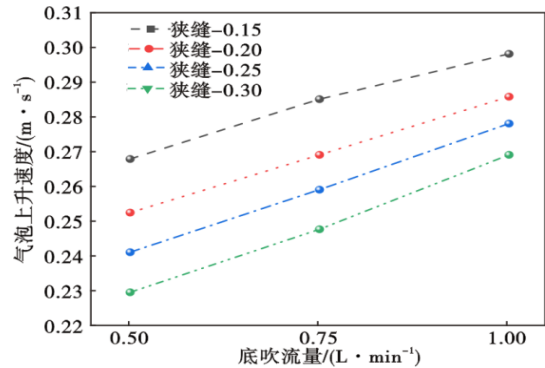


图 7 气泡平均上升速度随底吹流量和狭缝宽度的变化

Fig. 7 The average rising velocity of bubbles varies with the bottom blowing flow rate and slit width

3.3 狭缝宽度和底吹流量对气泡受力的影响

气泡的在不同工况下的主要受力计算结果如图 8 所示。由图 8 可知,气泡受力随狭缝宽度和底吹流量的增大而增大。重力和附加质量力数量级较小,浮力和曳力对气泡的运动起主导作用,且其大小几乎相等,即气泡在浮力和曳力作用下,匀速向上运动。分析浮力和曳力变化规律,可知,随着底吹流量和狭缝宽度的增加,气泡所受浮力和曳力增大,但是其增长幅度有所差异。当底吹狭缝宽度增加为 0.30 mm 时,相比 0.25 mm 时力的增长幅度明显。

3.4 狭缝宽度和底吹流量对混匀效果的影响

底吹气泡运动状态的改变会影响溶液的混匀效果,通过测定不同部位液体电导率趋于一致时

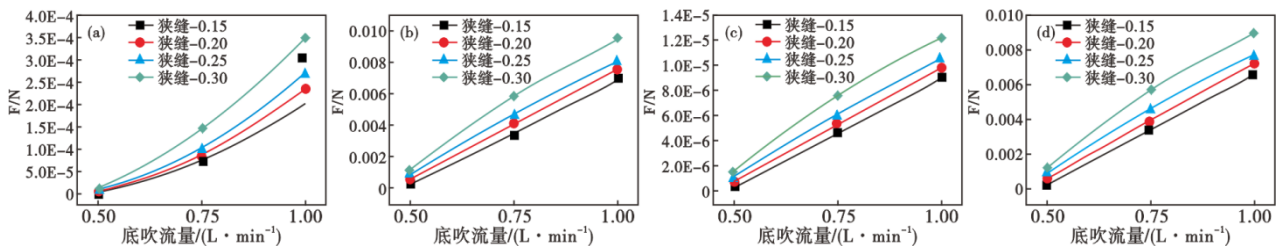


图 8 气泡受力随底吹流量和狭缝宽度的变化;(a)附加质量力,(b)浮力,(c)重力,(d)曳力

Fig. 8 The bubble force changes with the bottom blowing flow rate and slit width (a)additional mass;(b)buoyancy;(c)gravity;(d)drag force

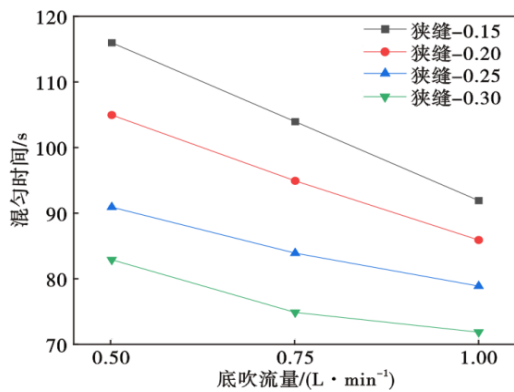


图9 混匀时间随底吹流量和狭缝宽度的变化

Fig. 9 The mixing uniform time varies with the bottom blowing flow rate and slit width

间为混匀时间,来反应气体对熔池的搅拌强度^[22-24],不同工况下的混匀时间如图9所示。混匀时间随狭缝宽度和底吹流量的增加而减小。由气泡运动行为分析可知,狭缝宽度越大、底吹流量越大,气泡分布越均匀,气泡索特直径越大,气泡越大,所受浮

力、曳力增加,在曳力带动下,强化液体的搅拌,混匀时间缩短。由图9可知,当狭缝宽度为0.30 mm、底吹流量为1.00 L/min时,溶液的混匀时间最小为72 s。综上分析,底吹元件采用狭缝型透气砖时,为了获得高的搅拌强度,在保证安全的前提下,应采取较大的缝隙宽度及较大的气体流量。

4 结论

(1)实验条件下,气泡个数变化为20~47个,索特直径变化为3~12 mm;随狭缝宽度和底吹流量的增大,气泡个数减少,气泡直径增加,底吹流量越大,狭缝宽度对气泡索特直径影响程度越小;

(2)气泡在浮力和曳力作用下,以0.23~0.30 m/s的平均速度匀速向上运动,上升速度与底吹流量成正比,与狭缝宽度成反比;

(3)在曳力的作用下,气泡携带液体形成环流,促进了溶液的混匀,混匀时间与狭缝宽度和底吹流量成反比,实验条件下,当狭缝宽度为0.30 mm,底吹流量为1.00 L/min时,混匀时间最短,为72 s。

参考文献

- [1] 寇志奇, 范天元, 张立明, 等. 狭缝式透气砖的研制与应用[J]. 耐火材料, 2001, 35(2): 92-94.
- [2] 刘辉敏, 孙加林, 王金相. 吹氩期间狭缝数量和尺寸对透气砖热梯度应力的影响[J]. 耐火材料, 2009, 43(3): 199-202.
- [3] 何平, 谢计卫. 不同透气砖钢包底吹特性的水模研究[J]. 炼钢, 1995, 11(5): 45-46.
- [4] 潘时松. 钢包狭缝式底喷粉元件研制及粉气流行为特性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [5] Zhou X B, Ersson M, Zhong L C, et al. Numerical and physical simulations of a combined top-bottom-side blown converter [J]. Steel Research International, 2015, 86(11): 1328-1338.
- [6] Raymond F, Rosant J M. A numerical and experimental study of the terminal velocity and shape of bubbles in viscous liquids [J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(5): 943-955.
- [7] Saffman P G. On the rise of small air bubbles in water [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1956, 1: 249-275.
- [8] Van D M, Wehausen J V, Lumley J L. Annual review of fluid mechanics [J]. Annu. Rev. Fluid Mech, 1978, 10.
- [9] Ellingsen K, Risso F. On the rise of an ellipsoidal bubble in water: Oscillatory paths and liquid-induced velocity [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 440(1): 235-268.
- [10] 张春辉, 云茂帆. 影响钢包底吹气孔口处底吹气泡上浮的因素[C]. 2018年(第二十届)全国炼钢学术会议大会报告及论文摘要集. 成都, 2018: 116.
- [11] 徐玲君, 陈刚, 邵建斌, 等. 单个气泡静水中上升特性的数值模拟[J]. 沈阳农业大学学报, 2012, 43(3): 357-361.
- [12] 巩子琦, 蔡杰进, 王焯. 单个气泡上升行为的可视化实验研究[J]. 核科学与工程, 2019, 39(6): 1030-1039.
- [13] 汪成义, 吴巍, 姜周华, 等. 210 t转炉底吹供气参数优化模拟研究[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(3): 202-208.
- [14] 薛瑞, 张燕超, 张彩军, 等. 转炉底吹供气方式对熔池混匀效果的数值模拟[J]. 中国冶金, 2020, 30(3): 13-20.
- [15] 杨宇, 李明明, 余珊, 等. VD真空精炼多喷嘴底吹气液两相流的数值模拟[J]. 材料与冶金学报, 2022, 21(4): 261-267.
- [16] 于鹏飞, 刘小亮, 曾加庆, 等. 转炉底吹元件非均衡供气搅拌的冷态水模拟[J]. 钢铁, 2018, 53(6): 39-46.
- [17] 毛宁. 气液多相流中气泡几何特征及动力学行为研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
- [18] 李东林, 王伟之, 韩继康, 等. 多相流体系中气泡运动特性研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(5): 1559-1564.
- [19] 李姣, 于会香, 王新华, 等. 转炉底吹枪优化布置的数值模拟[J]. 钢铁, 2018, 53(2): 32-39.
- [20] 秦绪锋, 程常桂, 李阳, 等. 中间包上水口环形吹氩下气泡大小和迁移行为研究[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(8): 768-781.
- [21] 刘小亮, 曾加庆, 马登, 等. 转炉底吹供气方式对熔池搅拌的影响[J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(12): 990-996.
- [22] 董进强, 高福彬, 李建文, 等. 邯钢260 t转炉吹炼工艺的水力学模拟及应用[J]. 河南冶金, 2019, 27(3): 36-39.
- [23] 杨晨. 120吨顶底复吹转炉水力学模型优化研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2016.
- [24] 曹玲玲. 转炉熔池气-渣-金多相流行为的模拟研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.