

搅拌转速对铁水脱硫喷吹 搅拌复合工艺的影响

Influence of Stirring Speed on the Injection Stirring Composite Process of Molten Iron Desulfurization

供稿|于林辉¹, 吕超^{1,2}, 张海炜², 陈学东¹, 齐鹏远^{1,3} / YU Linhui¹, LÜ Chao^{1,2}, ZHANG Haiwei², CHEN Xuedong¹, QI Pengyuan^{1,3}

内容 导 读

镁蒸气喷吹搅拌复合工艺可有效提高铁水脱硫效率,对改善钢材性能、扩大转炉规模等方面具有显著优势。本文利用计算流体力学软件对搅拌槽进行数值模拟,详细研究搅拌转速对喷吹-搅拌反应器内部流场、湍动能、气含率及单气泡破碎的影响。结果表明:搅拌转速为 120 r/min 时,湍动能最平稳,最有利于搅拌槽内的气泡形成,可快速达到平稳状态,且气泡的破碎更均匀;转速为 120、140 r/min 时,可在获得稳定湍动能的同时,达到相对稳定的气泡生成效率;转速越快,单个气泡破碎程度越高,当转速 > 140 r/min 时,气泡最大直径 < 1 mm。

镁蒸气炉外脱硫技术原理如下:在镁蒸气炉外部喷入含有还原剂的热空气,还原出的镁金属与硫化物反应生成易挥发的 MgS 化合物,从而实现脱硫。现有脱硫工艺主要有复合喷吹脱硫和 KR 搅拌脱硫 2 种^[1-2],但脱硫过程中铁水内气泡较大,影响脱硫效率^[3-4]。张廷安等^[5]提出“机械搅拌原位脱硫”的新型技术,该喷吹搅拌复合工艺是依靠一定压力和流量的氮气,将镁蒸气经管道输送至喷枪,再从喷枪底部的喷孔喷出,在镁蒸气上浮与机械搅拌的共同作用下,形成细化和分散的镁蒸气气泡,与铁水中的硫发生脱硫化学反应^[6]。目前,鞍钢集团有限公司、首钢集团有限公司等均已开展喷吹搅拌复合

工艺的相关研究,该工艺兼顾喷吹脱硫和搅拌脱硫的优点,脱硫效率较高,在改善钢性能、扩大转炉炼钢规模等方面优势明显。由于镁蒸气脱硫装置具有高温和不可视的特点,目前尚无有效方法观察实际脱硫装置内真实流体的混合状况,因此数值模拟和水模型实验成为研究其内部气液混合行为的常用手段。国内外学者已开展相关研究工作。水模型实验方面^[7-8],部分学者搭建试验台,采用十字型桨叶研究搅拌-喷吹法装置的气液流动,分析影响气泡破碎的操作方式和操作条件;蒋麒麟等^[9]针对四叶搅拌喷吹复合脱硫搅拌器,研究了搅拌器不同磨损程度对 KR 法脱硫流场特性的影响。数值模拟研究方

作者单位:1. 营口东邦环保科技股份有限公司,辽宁 营口 115199;2. 东北大学秦皇岛分校,河北 秦皇岛 066004;3. 营口理工学院,辽宁 营口 115014

面^[10]，通常利用计算流体力学（CFD）技术对多种搅拌模型进行气液两相流非稳态数值模拟，探究速度场、气相体积分数和功率耗损情况；Lü等^[11-12]分析搅拌行为对气泡分布位置及气泡直径的影响，以及气泡在反应器内的破碎和聚并过程；此外，Shao等^[13]、He等^[14]探究了反应器结构对流场的影响（如搅拌桨从中心移至侧壁对气泡尺寸的影响），并对比了单喷嘴、双喷嘴（对称和非对称）和四喷嘴（对称和非对称）的熔池流场、死区比例、平均湍动能和混合时间。

在喷吹搅拌反应器中，复合工艺的操作参数往往影响脱硫效率。本文针对镁蒸气喷吹搅拌复合工艺，采用CFD模拟方法，详细研究搅拌转速对喷吹-搅拌反应器内部流场、湍动能、气含率及单气泡破碎的影响，研究结果可为该工艺反应器的设计及工

艺优化提供数据支撑。

模型的建立

几何建模

本文以镁蒸气喷吹搅拌法的水模型为研究对象，进行气液流动行为的数值模拟，为后续气泡破碎和分散行为的研究提供流场结构基础。计算时选取整个流场区域为计算域，对桨叶区和桨外区域分别进行网格划分，其中桨叶区采用非结构化四面体网格，桨外区域采用结构性网格。搅拌器几何模型与搅拌槽网格划分如图1所示。本文模拟研究的模型为直径450 mm、高480 mm的圆柱形熔池；搅拌轴垂直插入熔池中心，距底部60 mm；搅拌桨叶为4片，上下两端有明显弧度；喷嘴入口位于搅拌桨下方，4个入口直径均为15 mm。

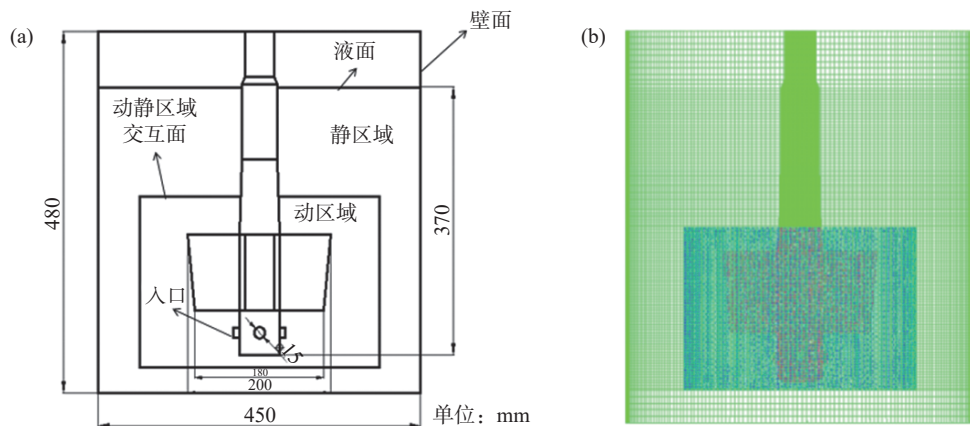


图1 搅拌器几何模型(a)与搅拌槽网格划分(b)

模型的选择

槽内液体在搅拌时处于湍流模式，采用稳定不可压缩流工况下的标准 $k-\epsilon$ 模型。欧拉模型为双流体模型，可分别求解每一相的动量及质量守恒方程，精确描述气液两相流的流场特性，还可追踪气液界面变化，观测气泡的形成。前期选择欧拉模型对流场气液两相流进行模拟，其参数选取 Multi-fluid VOF Model 模块，以实现气泡的追踪。为了精确描述气泡的运动情况，设置相间作用力，包括曳力、虚拟质量力及升力。采用滑移网格法处理槽内搅拌，两相交面设定为交界面；搅拌器叶片为运动壁面，动区域与搅拌器同步转动，初始转速为 120 r/min；罐壁及下底面设置为壁面；喷嘴表面设置为速度入

口，通入氮气，通气流量为 $1.78 \text{ m}^3/\text{h}$ ；自由液面初始为静止状态，液面初始高度设为 400 mm；时间步长设为 0.001 s，计算时间为 10 s。

结果与讨论

实验验证

流场流线模拟结果对照如图2所示，采用四叶搅拌桨模型对反应器内喷吹搅拌复合工艺进行数值模拟，得到流场流线云图。桨叶上方的流线呈螺旋上升趋势，气体进口附近则呈交叉趋势，增强了底部气液流动。与文献[9]的流线模拟云图对照，整体趋势保持一致，均分为2部分，搅拌桨上部形成一个涡流，搅拌桨下方区域形成“ ∞ ”循环涡流。图3(a)

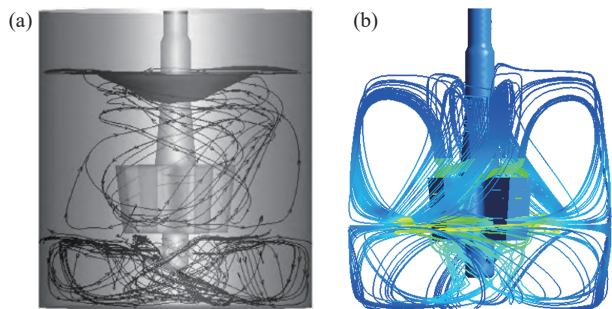


图2 流场流线模拟结果对照: (a) 文献 [9] 的模拟图; (b) 本文模拟图

表明, 搅拌轴沿逆时针转动时, 水中会产生大量气泡, 分布在搅拌槽的各个位置, 搅拌桨周围气泡密集, 但搅拌桨下方存在“死区”, 因搅拌桨的扰动作用较弱, 气泡含量较少。图 3(b) 为相应的模拟结果, 与实验对比差异极小, 由此证明本文选择的模拟参数合理。

搅拌转速对流场的影响

转速过高会导致流场不稳定, 易造成液体飞溅等问题, 还会使漩涡加深, 引起外界空气倒灌; 转速过低则无法有效分散和破碎气泡, 易形成大团气

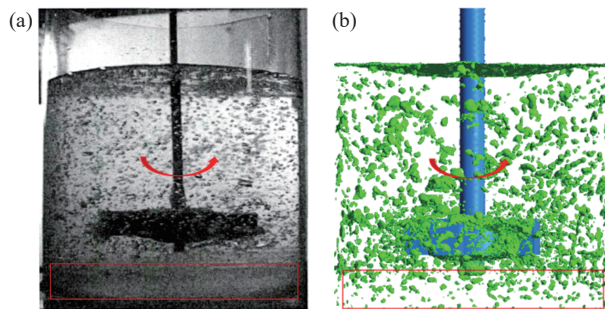


图3 气泡分布图: (a) 实验图; (b) 模拟图

泡, 导致气体快速逃逸出液面。因此, 本文选择搅拌转速 n 为 80 和 120 r/min 进行研究, 这 2 种转速下流场稳定, 且具备一定的气泡分散破碎能力。不同转速下的流场如图 4 所示, 可见靠近搅拌桨位置的流场密集, 速度较大。搅拌作用使流体在搅拌桨轴上下 2 个区域形成循环流, 这对气泡破碎起到重要作用; 搅拌转速越大, 循环流趋势越明显, 作用范围越广。不同转速下的气泡破碎状态如图 5 所示, 转速增大时, 气泡破碎更均匀。这是因为搅拌桨的撞击及液体的湍流作用更强烈, 对气泡生成具

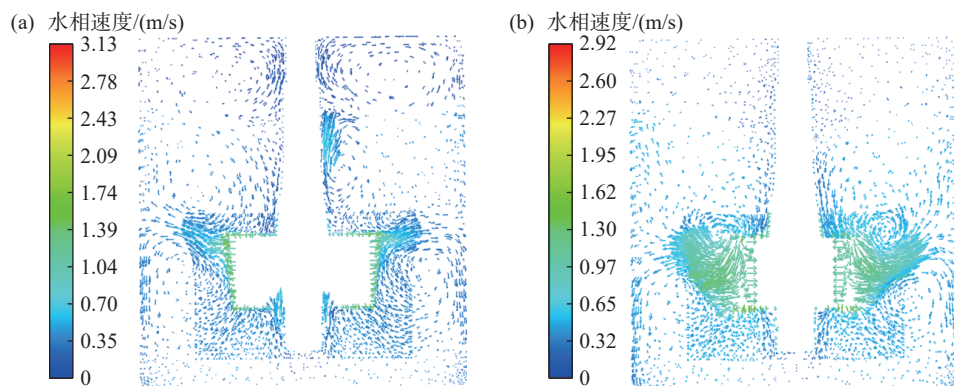


图4 不同转速下的流场: (a) $n=80$ r/min; (b) $n=120$ r/min

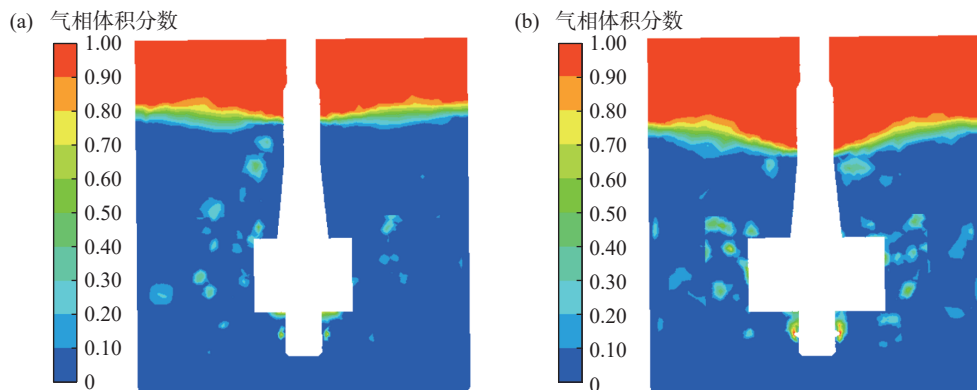


图5 不同转速下的气泡破碎状态: (a) $n=80$ r/min; (b) $n=120$ r/min

有促进作用；当转速增大时，搅拌桨周围流体流速会加快，导致流体的剪切作用增强，使得气泡破碎后的尺寸更小；小气泡体积小，受到的阻力也 smaller，更易在液体的裹挟下分布到整个槽内。

搅拌转速对湍动能的影响

湍动能是判断气泡破碎程度的重要指标，在研究搅拌流场的速度流线变化后，以不同的转速为输入量，分析其对搅拌流场的影响。选取搅拌速度为 80、100、120、140、160 r/min，搅拌时间为 5~10 s，分析不同转速对流场湍动能的影响。

图 6 为不同转速下搅拌轴运动 8 s 后的湍动能云图

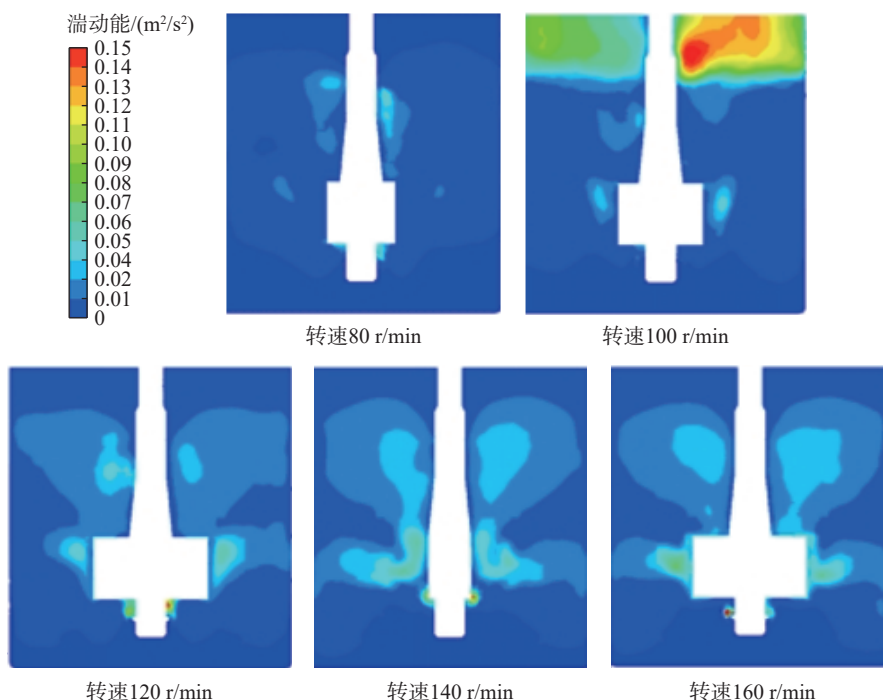


图 6 不同转速下的湍动能云图

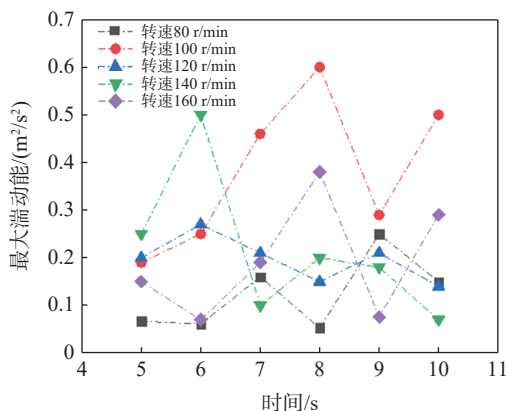


图 7 不同转速下的最大湍动能变化

图，可见 100 r/min 转速下，搅拌槽内部发生激烈的湍流作用；而转速为 120、140、160 r/min 时，搅拌过程中搅拌器底部呈涡流状，湍流作用较平稳。图 7 为不同转速下的最大湍动能变化，可见四叶喷吹搅拌流场中，120 r/min 转速下，湍动能最平稳，此时最有利于搅拌槽内的气泡形成，可快速达到平稳状态，气泡的破碎也更均匀；当转速为 80 r/min 时，搅拌槽内的湍动能最低，不利于气泡的生成和破碎；当转速为 100 r/min 时，湍动能变化最大，最大区域一般在液面；当转速 > 120 r/min 时，湍动能难以在有限时间内达到平衡，变化无规律。

搅拌转速对气含率的影响

图 8 为不同转速下，搅拌轴运动 8 s 后不同位置的气体含量，可见在 80 r/min 转速下，搅拌槽内部的气体含量最低；当转速为 100、120、140 r/min 时，气泡含量较高。其中，在距喷嘴 120 mm 处气泡含量最高，这是因为该区域位于搅拌轴上方的循环流区，搅拌桨的撞击和循环流对气泡的生成产生重要影响，加速了气泡生成。当转速为 100 r/min 时，搅拌槽内的湍流作用最强烈，对气泡的影响最大；当转速为 120、140 r/min 时，搅拌槽内的湍动能最

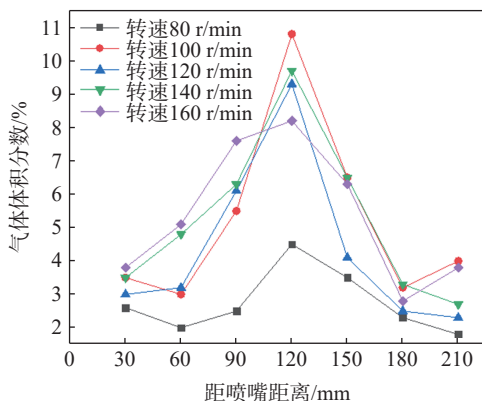


图8 不同转速下搅拌轴运动8 s后不同位置的气体含量
稳定, 气泡的生成效率也较高。

搅拌转速对气泡破碎效果的影响

在搅拌器的流场特性基本稳定后, 气泡初始位置如图9所示。在整个槽内区域, 搅拌桨的搅拌作用使气泡多呈圆球形或椭圆形, 且气泡尺寸越小, 呈圆球形的概率越大。此外, 在气泡上升过程中形状会不断变化, 在球形与椭圆形之间交替转换。由于初始气泡为球状具有代表性, 更易观察其变化过程, 因此在搅拌器桨叶附近初始化一个直径为15 mm、表面张力为0.5 N/m的球状气泡, 以研究不同搅拌桨转速下气泡的破碎效果。

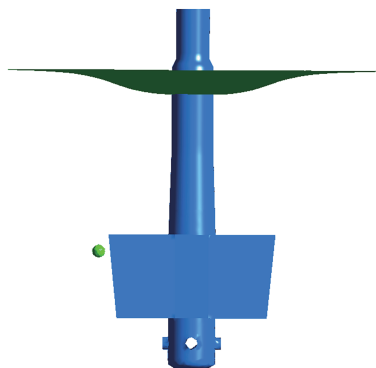


图9 气泡初始位置

在搅拌流场中, 桨叶附近流体流速最快, 同时也是湍流作用最激烈的位置。气体从喷嘴喷出后, 在搅拌桨的作用下破碎为大小不一的气泡, 其中桨叶附近为气泡破碎的主要位置, 对整个搅拌器内气泡尺寸起决定性作用。图10为单个气泡在120 r/min转速下的破碎情况, 气泡从圆球形逐渐被拉长, 随后在流体的剪切作用下发生破碎。图11为150 r/min

转速下, 0.3 s内气泡的破碎情况。对比发现, 在150 r/min转速下气泡破碎得更快, 尺寸更小。这是由于搅拌桨转速越高, 桨叶附近的流体流动越剧烈, 流体的速度梯度随之增大, 从而对气泡的剪切作用更强。在搅拌器中, 桨叶附近的气泡尺寸往往最小, 之后这些小尺寸气泡会在远离搅拌桨桨叶的区域发生聚并, 形成较大尺寸的气泡。

0.5 s时不同转速下气泡的最大直径如图12所示。当转速>140 r/min时, 气泡已基本完全破碎,

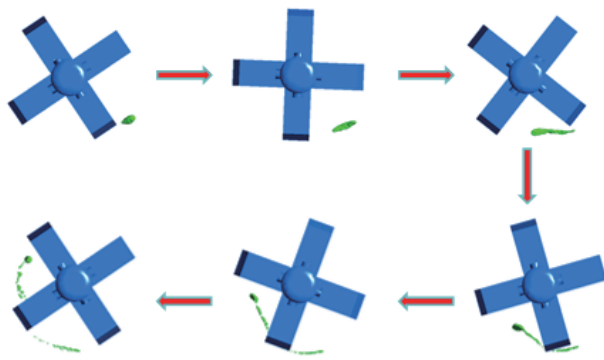


图10 120 r/min 转速下 0.3 s 内气泡破碎情况

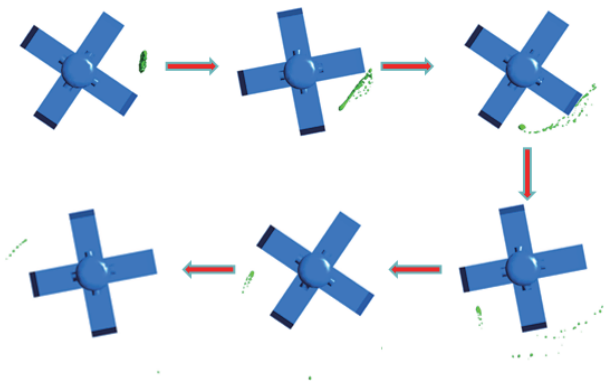


图11 150 r/min 转速下 0.3 s 内气泡破碎情况

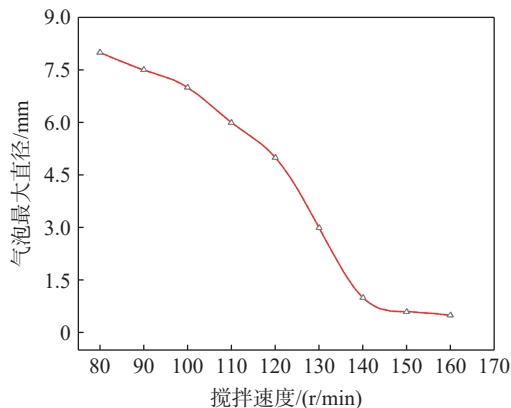


图12 0.5 s 时不同转速下气泡的最大直径

最大直径已不足 1 mm, 之后其最大直径基本不再变化; 而低转速时, 气泡的破碎效果普遍偏差。当转速为 80 r/min 时, 直径 15 mm 的大气泡破碎为多个小气泡后, 其中最大直径为 8 mm 的子气泡在远离桨叶后难以进一步破碎; 当转速 > 100 r/min 时, 气泡最大直径在 0.5 s 后会继续减小, 且减小程度随着转速的增加而增大。

结束语

(1) 搅拌转速增大, 循环流趋势更明显, 作用范围更广; 搅拌转速越大, 气泡破碎越均匀。当转速为 120 r/min 时, 湍动能最平稳, 最有利于搅拌槽内的气泡形成, 可快速达到平稳状态, 且气泡的破碎更均匀。

(2) 当转速为 100 r/min 时, 搅拌槽内的湍流作用最强烈, 对气泡的影响最大; 当转速为 120、140 r/min 时, 可在获得稳定湍动能的同时, 达到相对稳定的气泡生成效率。本文未细化分析搅拌转速对气泡的聚合行为, 将在后续研究中完善。

(3) 在不同转速下, 单个气泡的破碎效果差异较大, 当转速 > 140 r/min 时, 气泡的最大直径已不足 1 mm, 破碎效果良好; 转速过低时, 流体的湍流程度弱、速度梯度小, 对气泡的剪切作用不强, 难以实现有效破碎。

参考文献

- [1] 张茂林, 徐安军. KR 法与喷吹法在铁水脱硫中应用的比较. 炼钢, 2009, 25(5): 73
- [2] 兰天, 李志强. 高效率低成本铁水脱硫模式探讨. 冶金丛刊, 2013(4): 19
- [3] 肖忠敏, 陈复汉. KR 铁水脱硫技术的应用. 炼钢, 1990, 6(6): 9
- [4] 陈圣鹏. 包钢 150 t 转炉配套铁水脱硫工艺及设备的选择. 包钢科技, 2012, 38(6): 7
- [5] 张延安, 刘燕, 赫冀成, 等. 原位机械搅拌炉外脱硫方法及装置: 中国专利, 101298631. 2011-06-15
- [6] 堵亚光, 戴守军. 铁水应用镁粒脱硫技术简介. 天津冶金, 1999(4): 19
- [7] Liu Y, Zhang T A, Masamichi S, et al. Study on absorption rate by eccentric mechanical stirring in gas injection refining for iron and steel making // *Proceedings of the 2nd International Symposium on Clean Steel*. Shenyang, 2011: 166
- [8] Liu Y, Zhang Z M, Liu J N, et al. Cold model study on Mg desulfurization of hot metal under mechanical stirring. *J Iron Steel Res Int*, 2013, 20(12): 1
- [9] 蒋麒麟, 但斌斌, 李清勇, 等. 搅拌器磨损对搅拌喷吹法脱硫流场影响的数值分析. 工业炉, 2022, 44(1): 1
- [10] 姚晨明, 石秀东, 彭晶鑫. 基于 CFD 的不同搅拌组合多相流流场研究. 轻工机械, 2021, 39(4): 20
- [11] Lü C, Chen X X, Zhang H W, et al. Simulation study on fluid flow performance of injection stirring composite process in molten iron desulfurization process. *J Iron Steel Res Int*, 2023, 30(12): 2403
- [12] Lü C, Chen X X, Ji Z X, et al. Simulation of bubble breaking process in a jet mixing reactor for desulfurization of molten iron. *J Iron Steel Res Int*, 2023, 30(6): 1117
- [13] Shao P, Liu S X, Miao X C. CFD-PBM simulation of bubble coalescence and breakup in top blown-rotary agitated reactor. *J Iron Steel Res Int*, 2022, 29(2): 223
- [14] He Y B, Guo W K, Li Y H, et al. Numerical simulation of flow characteristics of side-bottom combined blowing in iron bath reactor. *J Iron Steel Res Int*, 2023, 30(2): 236

基金项目: 营口市企业博士双创计划资助项目 (QB-2022-06); 营口英才计划 (青年拔尖人才) 资助项目 (YKYC-2022)。

作者简介: 于林辉 (1974—), 男, 辽宁省营口市, 高级工程师。主要研究方向: 炼钢工艺新技术。通信地址: 辽宁省大石桥市经济开发区营口东邦环保科技股份有限公司; E-mail: dbyulinhui@163.com。

通信作者: 齐鹏远 (1981—), 男, 辽宁省营口市, 博士, 教授。主要研究方向: 材料加工技术。通信地址: 辽宁省营口市博文路 46 号营口理工学院; E-mail: qipengyuan@126.com。