

特约论文



王海军 博士、副教授、博士生导师, 现任安徽工业大学冶金工程学院院长助理, 并担任江西省钢铁产业创新联合体联席会成员、安徽省金属学会监事、江苏省委组织部高层次人才。《电工钢》杂志编委, 以及《钢铁》《中国冶金》《连铸》《安徽工业大学学报(自然科学版)》青年编委。主要研究方向为电工软磁材料微观结构调控, 主持国家自然科学基金2项、安徽省科技攻坚计划重点项目1项、安徽省高等学校科学研究重点项目1项, 以及企业产学研项目30余项。发表学术论文50余篇, 授权发明专利30余件。

桨叶结构对 KR 脱硫混合效果影响的数值模拟

操瑞宏^{1,2}, 程 功¹, 廖建军², 钟 巍², 仇圣桃¹, 王海军¹

(1. 安徽工业大学 冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243032; 2. 新余钢铁股份有限公司 厚板事业部, 江西 新余 338001)

摘要: 为了改善 KR 脱硫过程中脱硫剂利用率低的问题, 设计 4 种利于工业实现的桨叶结构以改善 KR 脱硫混合效果。采用数值模拟方法, 以速度场、湍动能、混匀时间以及脱硫剂分布为表征, 分析铁水的卷吸能力与混合效果。通过对比 4 种桨叶结构的铁水流动特征, 探究桨叶结构对 KR 脱硫混合效果的影响规律。结果表明: 搅拌桨旋转作用下桨叶底部铁水形成速度不超过 0.6 m/s 的弱流区, 斜叶桨虽然能够增强铁水卷吸能力, 但对弱流区的改善作用有限; 桨叶叶数参数对弱流区的影响强于桨叶倾角参数, 三叶桨可有效提升铁水动力学性能并减小弱流区体积。斜叶桨具有局部快速混合的优势, 而直叶桨更适合铁水包整体混合需求; 直四叶桨的铁水混匀时间最短, 在转速 90 r/min 下为 49.48 s, 较斜四叶桨与直三叶桨分别缩短了 2.8%, 2.7%。斜叶桨因涡流卷吸效应较强易导致脱硫剂团聚, 直四叶桨底部脱硫剂占比约为斜四叶桨的 2 倍, 更有利于铁水与脱硫剂混合, 从而显著提高 KR 脱硫混合效果。

关键词: 铁水预处理; KR 脱硫; 桨叶结构; 弱流区; 湍动能; 混匀时间; 脱硫剂; 数值模拟

中图分类号: TF 53 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.25042



收稿日期: 2025-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52374316); 安徽省科技攻坚计划重点项目(202423i08050049); 安徽省高校自然科学基金重点项目(2022AH050291)

作者简介: 操瑞宏(1983—), 男, 安徽六安人, 博士生, 主要研究方向为炼钢与连铸工艺开发。

通信作者: 王海军(1988—), 男, 安徽亳州人, 博士, 副教授, 主要研究方向为电工钢冶炼及连铸新技术开发。

引文格式: 操瑞宏, 程功, 廖建军, 等. 桨叶结构对 KR 脱硫混合效果影响的数值模拟[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2025, 42(3):235-244.

Numerical Simulation of the Influence of Blade Structure on Mixing Effect in KR Desulfurization

CAO Ruihong^{1,2}, CHENG Gong¹, LIAO Jianjun², ZHONG Wei², QIU Shengtao¹, WANG Haijun¹

(1. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China; 2. Thick Plate Division, Xinyu Iron and Steel Co. Ltd, Xinyu 338001, China)

Abstract: In order to improve the low utilization rate of desulfurizer in KR desulfurization process, four kinds of blade structures which were beneficial to industrial realization were designed to improve the mixing effect of KR desulfurization. The entrainment capacity and mixing effect of molten iron were analyzed by numerical simulation method, which was characterized by velocity field, turbulent kinetic energy, mixing time and desulphurizer distribution. By comparing the flow characteristics of molten iron with four kinds of blade structures, the influence of blade structure on the mixing effect of KR desulfurization was explored. The results show that under the action of impeller rotation, the formation rate of molten iron at the bottom of the impeller is not more than 0.6 m/s in the weak flow zone. Although the inclined blade impeller can enhance the entrainment capacity of molten iron, the improvement effect on the weak flow zone is limited. The influence of the blade number parameter on the weak current region is stronger than that of the blade inclination parameter. The three-blade propeller can effectively improve the hydrodynamic performance of the iron and reduce the volume of the weak current region. The inclined blade propeller has the advantage of local rapid mixing, while the straight blade propeller is more suitable for the overall mixing demand of the iron ladle. The molten iron mixing time of the straight four-blade impeller is the shortest, which is 49.48 s at the speed of 90 r/min, which is 2.8% and 2.7% shorter than that of the oblique four-blade impeller and the straight three-blade impeller, respectively. The inclined blade impeller is easy to cause the agglomeration of desulfurizer due to the strong vortex entrainment effect. The proportion of desulfurizer at the bottom of the straight four-blade impeller is about twice that of the inclined four-blade impeller, which is more conducive to the mixing of molten iron and desulfurizer, thus significantly improving the KR desulfurization mixing effect.

Keywords: hot metal pretreatment; KR desulfurization; blade structures; weak flow region; turbulent kinetic energy; mixing time; desulfurizer; numerical simulation

硫是钢中的有害元素,其含量过高会显著劣化钢材的磁性能和机械性能^[1-2],进而制约高端钢材在电力^[3]、汽车^[4-6]以及精密制造等关键领域的应用^[7]。随着“中国制造 2025”战略的深入推进,以及新能源汽车^[8]、高端装备^[9-11]等新兴产业对高品质钢材需求的持续增长,开发低硫钢及超低硫钢已成为我国钢铁行业实现绿色化转型^[12]、高端化发展^[13]的重要路径。在钢铁生产流程中,铁水预处理环节的脱硫效率直接影响钢材的硫含量控制水平。目前, KR 脱硫法凭借其操作简便性^[14-15]、优异的深脱硫能力与工艺稳定性^[16-18],以及突出的成本效益与反应动力学优势^[19-21],已成为国内外现代化钢铁企业的主流脱硫技术^[22]。然而,生产调研^[23-24]显示,部分钢铁企业 KR 脱硫渣样中残留的 CaO 含量偏高,表明存在脱硫剂利用率不足、熔池混合效果不均等问题,严

重制约了脱硫效率的进一步提升。因此,深入研究 KR 脱硫过程中的混合动力学机制,通过搅拌桨结构优化强化铁水-脱硫剂相互作用,对于提高脱硫剂反应效率、降低吨钢生产成本、推动钢铁行业低碳转型具有重要工程价值。

为提升 KR 脱硫工艺的动力学效率并优化熔池混合效果,国内外学者围绕搅拌桨叶结构参数优化开展了大量研究。晏颖等^[25]研究表明,双层正四叶桨结构使铁水轴向速度更大、平均湍动能提升 28%、混匀时间缩短 7.3%,显著改善了 KR 脱硫流场特性。贾舒渊等^[26]研究表明,相较于传统四叶桨结构,双层三叶桨使铁水包底部区域脱硫剂质量分数提升 172.41%,尽管流场涡高仅增加 5.47%,这一结构改进显著提升了脱硫反应效率。纪俊红等^[27]研究表明,方形桨的涡流卷吸效应显著增强了铁水混合

效果,使柱状回转区范围减小 60%,弱流区体积减小 67%,混匀时间缩短 52%。周剑丰等^[28]的工业试验证实,当浆叶直径与铁水包直径比优化至 0.38 时,脱硫剂单耗降低 3.4%,同时搅拌时间缩短 1.1 min。Busciglio 等^[29]揭示了搅拌浆结构与铁水流涡状态的关联机制,证实转速提升可有效改善混匀效果。Lee 等^[30]通过 7 种浆叶模型的模拟研究表明,直叶浆的脱硫效率较螺旋浆叶提升约 14%,为浆叶选型提供了重要依据。尽管现有研究在不同程度上强化了 KR 脱硫反应的混合动力学特性,但复杂结构的搅拌浆存在使用寿命短、维护成本高等问题,难以满足工业化生产需求。在当前钢铁行业全面推进智能制造和绿色制造的背景下,急需开发结构简单、性能稳定且易于维护的搅拌浆。基于此,从工业实用化角度出发,重点考察浆叶倾角与叶数两个关键参数,设计 4 种结构简单且易于工业实施的浆叶模型,采用数值模拟方法研究其对 KR 脱硫混合效果的影响规律,以期对搅拌浆优化设计和脱硫剂高效利用提供科学依据和技术支撑。

1 数值模拟

1.1 物理模型

以某钢厂 280 t 铁水包为原型构建物理模型,如图 1。该铁水包呈倒置圆台形,上端直径大于下端直径,包体总高为 H_{ladle} ,初始铁水液位高度为 H_s ,定义搅拌浆插入深度 H_{in} 为浆叶上表面至初始液位的垂直距离。

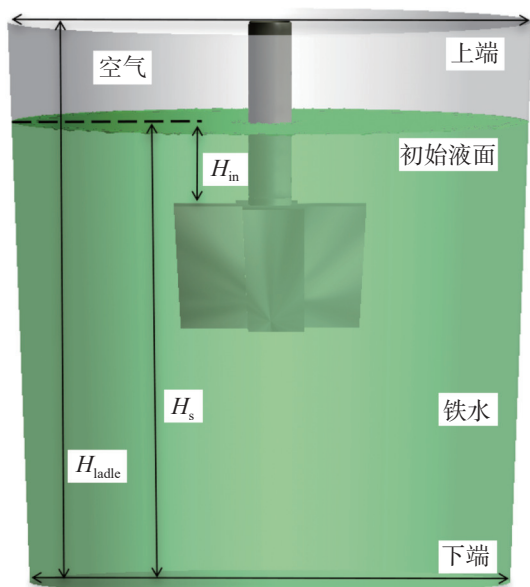


图1 铁水包示意图

Fig. 1 Schematic diagram of iron ladle

为探究浆叶结构的影响,设计 4 种浆叶结构(图 2): 常规四叶浆 A(浆叶倾角 90°)、斜四叶浆 B(倾角 75°)、常规三叶浆 C(倾角 90°) 以及斜三叶浆 D(倾角 75°)。所有浆叶保持相同的长度与高度尺寸,模型相关尺寸与物性参数如表 1。

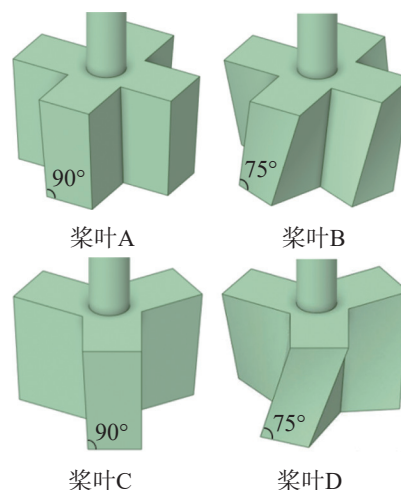


图2 浆叶结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of blade structure

表 1 模型尺寸及物性参数

Tab. 1 Model size and physical parameters

| 项目 | 尺寸参数 |
|---|---------|
| 铁水包深度/mm | 3 900 |
| 铁水包上顶面直径/mm | 3 650 |
| 铁水包下底面直径/mm | 3 340 |
| 浆叶上表面直径/mm | 1 340 |
| 浆叶下表面直径/mm | 1 240 |
| 浆叶高度/mm | 850 |
| 初始液面高度/mm | 3 200 |
| 插入深度/mm | 475 |
| 搅拌转速/($r \cdot \text{min}^{-1}$) | 90 |
| 铁水密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 7 140 |
| 铁水黏度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$) | 0.038 4 |
| 脱硫剂密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 3 400 |
| 脱硫剂初始粒径/mm | 1 |

1.2 控制方程

在数值模拟 KR 脱硫过程中,为分析浆叶结构对铁水流特性的影响,针对铁水流特性作如下基本假设:

- 1) 将铁水相视为不可压缩黏性牛顿流体,其密度和黏度保持恒定;
- 2) 忽略体系与外界的传热以及脱硫渣对铁水流场和温度分布的影响;

3) 将脱硫剂简化为均匀粒度的球形颗粒,并忽略体积效应对铁水流动的影响。

采用 Fluent 软件构建铁水包数学模型,以模拟分析 KR 脱硫的混合效果,具体方法为:采用流体体积(volume of fluid, VOF)多相流模型中的隐式分离法描述搅拌过程中铁水的流动;采用多重参考系法(multiple reference frame, MRF)描述桨叶的旋转;采用被动标量传输模型描述示踪剂在铁水中的传输过程;利用离散相模型(discrete phase model, DPM)描述脱硫剂在铁水中的分散状态。

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] + \rho g + F \quad (1)$$

式中: ρ 为混合相的密度; u 为运动速度; μ 为混合相的黏度; p 为压强; F 为源项。

VOF 模型:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_q \rho_q) + \nabla \cdot (\varphi_q \rho_q u_q) = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{q=1}^m \varphi_q = 1 \quad (3)$$

式中: φ_q 为第 q 相的体积分数; u_q 为第 q 相的速度; ρ_q 为第 q 相的密度; t 为时间; m 为连续相的总数。

湍动能 κ 方程:

$$\varphi_1 \rho_1 \left(\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \frac{\partial (\kappa u_i)}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\varphi_1 \left(\mu + \frac{\mu_{\text{turb}}}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + \varphi_1 G_\kappa - \varphi_1 \rho_1 \varepsilon \quad (4)$$

湍动能耗散率 ε 方程:

$$\varphi_1 \rho_1 \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\varepsilon u_i)}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\varphi_1 \left(\mu + \frac{\mu_{\text{turb}}}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \varphi_1 C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} G_\kappa - \varphi_1 C_{2\varepsilon} \rho_1 \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (5)$$

其中 G_κ 为湍动能源项,对应表达式为:

$$G_\kappa = u_{\text{turb}} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

式中: φ_1 为铁水的体积分数; ρ_1 为铁水的密度; u_i, u_j 分别为 i, j 方向的速度; x_i, x_j 分别为 i, j 方向的坐标; μ_{turb} 为湍流黏度; $C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92$ 为 κ - ε 模型中的经验常数。

在传输模型中,被动标量作为一种虚拟的示踪剂,其传输特性完全由流体流动主导。该标量不参与任何化学反应,也不会改变流体的物理性质,仅作为流动状态的示踪指标,其控制方程可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_1 w_{\text{scalar}}) + \nabla \cdot (\rho_1 u w_{\text{scalar}}) = \nabla \cdot (\rho_1 D_{\text{eff}} \nabla w_{\text{scalar}}) \quad (7)$$

其中: w_{scalar} 为被动标量的质量分数; D_{eff} 为有效扩散

系数,表达式为:

$$D_{\text{eff}} = D_1 + D_{\text{turb}} \quad (8)$$

式中 D_1 与 D_{turb} 分别为铁水与湍流的扩散系数。

离散相运动受牛顿第二定律控制,其方程为:

$$m_1 \frac{dv}{dt} = F_1 + F_g + F_2 + F_p + F_3 \quad (9)$$

式中: m_1 为离散相的质量; v 为离散相的速度; F_1, F_g, F_2, F_p 与 F_3 分别为曳力、重力、浮力、压力梯度力和虚拟质量力。

1.3 网格划分与边界条件设置

计算域采用分区离散化方法,将铁水包划分为静止区域和旋转区域。静止区域网格采用六面体与多面体网格相结合的方式划分,旋转区域网格为提高计算精度采用四面体网格划分,系统网格总数约 51 万个,如图 3。2 个计算区域通过界面(interface)进行数据交换以传递流动信息,进而实现对搅拌桨转动效果的数值模拟。

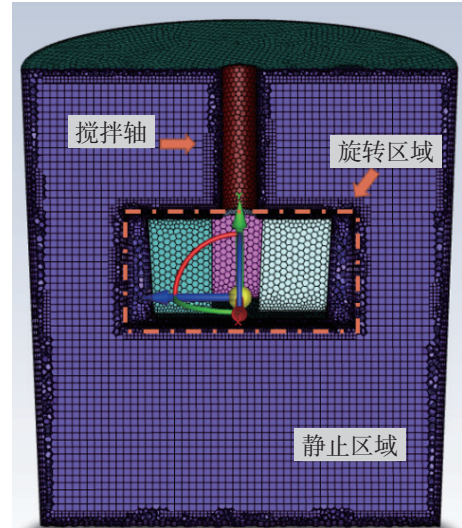


图3 网格模型

Fig. 3 Grid model

边界条件设置:将铁水包上顶面设为标准大气压的压力出口,搅拌轴及桨叶设为滑移壁面并与相邻区域同步转动,铁水包壁面与底部采用无滑移壁面条件,所有壁面均以标准壁面函数处理。采用 PISO(pressure implicit with splitting of operators) 算法对压力-速度进行耦合求解,动量方程和湍流模型方程均采用二阶迎风格式,时间步长设为 0.01 s,残差收敛标准为各项小于 0.001。

1.4 模拟验证

为验证数值模型的准确性,采用 1:5 比例缩小的铁水包水模型开展模拟研究,并与相应数值模拟结果进行对比。实验(水模拟)和数值模拟采用相

同的工况参数: 搅拌桨插入深度 95 mm, 工质为空气-水, 搅拌桨转速设为 112, 157, 180, 213 r/min。部分工况下漩涡形态的对比结果如图 4, 不同转速下涡深的定量对比结果如表 2。结果表明: 数值模拟准确再现了气液两相交界面的形态特征及位置分布; 在漩涡深度、涡底位置和形状等关键特征参数上, 模拟结果与实验结果数据具有良好的一致性, 各转速下涡深的相对差值不超过 10 mm。这些对比验证充分证明了本文数值模拟方法的合理性和准确性, 为后续铁水包 KR 脱硫过程的数值研究提供了可靠的方法学支撑。

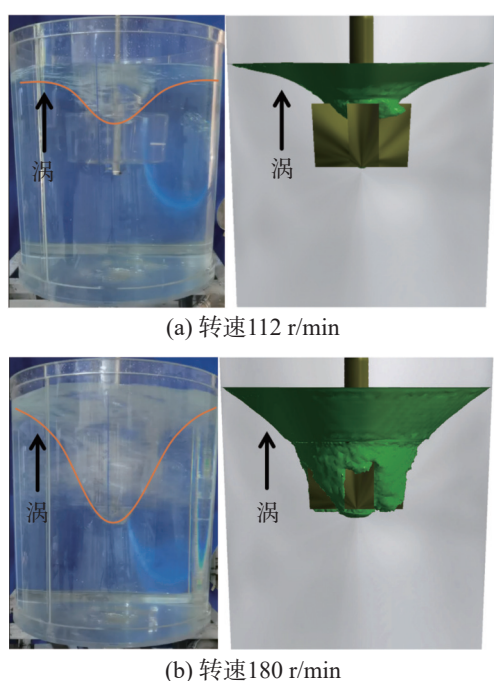


图4 水模型实验与数值模拟结果比较

Fig. 4 Comparison between water model experiments and numerical simulation results

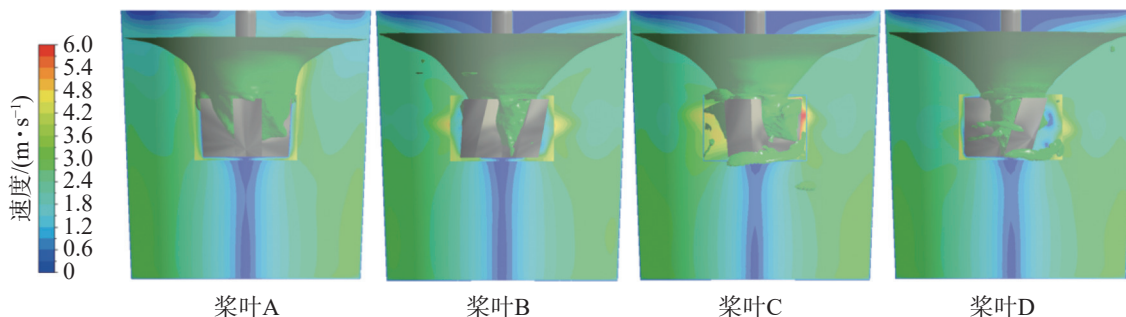


图5 不同桨叶结构下流场速度分布

Fig. 5 Velocity distribution of flow field under different blade structures

通过对比桨叶 A(常规四叶桨)与桨叶 C(常规三叶桨)的流场特征发现, 三叶桨附近铁水流速较大(超过 5.4 m/s), 且底部弱流区体积明显减小。这种

表 2 2 种模型不同转速下的涡深比较
Tab. 2 Comparison of vortex depth between two models at different speeds

| 转速/ ($r \cdot \min^{-1}$) | 水模拟/ mm | 数值 模拟/mm | 相对 差值/mm |
|--------------------------------|------------|-------------|-------------|
| 112 | 110 | 114 | 4 |
| 157 | 180 | 188 | 8 |
| 180 | 275 | 276 | 2 |
| 213 | 310 | 301 | 9 |

2 结果与讨论

以速度场、湍动能、混匀时间及脱硫剂分布为表征, 分析铁水的卷吸能力与混合效果。通过对比 4 种桨叶结构下铁水的流动特征, 探究桨叶结构对 KR 脱硫混合效果的影响规律。

2.1 流场速度与湍动能分布

4 种桨叶结构下铁水包流场轴向切面速度分布如图 5。由图 5 可看到: 在常规四叶桨(A 型)结构下, 流场速度沿桨叶径向递减, 桨叶附近最大速度达 4.8 m/s, 而包壁区速度降至 2.4 m/s; 值得注意的是, 铁水在搅拌桨旋转作用下呈圆周运动特征, 同时在桨叶底部形成流速极低的弱流区(速度不超过 0.6 m/s)。该区域因流体动能不足导致脱硫剂难以有效分布, 形成脱硫反应效率低下的“死区”。与桨叶 A 相比, 桨叶 B 由于采用倾斜叶片设计, 使铁水在桨叶处产生更大的速度, 提高了机械能转化为流体动能的效率, 从而显著提升了铁水轴向流速, 使铁水具有较大的动能向下流动; 桨叶下部弱流区体积差异不大, 说明倾斜桨叶虽然增强了桨叶附近铁水流速, 但对包底弱流区的改善效果较弱。

改善主要源于: 叶数减少使单叶片拥有更大的搅拌功率, 显著增强流体驱动力; 增大的叶片间隔可减弱铁水径向流动, 增强铁水轴向运动, 促进更多的轴向

动能传递至包底,有效减小弱流区体积。4种桨叶的漩涡形态表明,倾斜桨叶结构下铁水流漩涡深度较大,且涡心结构呈锥形,有利于聚集脱硫剂并将其卷入铁水中,提高了铁水的卷吸能力;值得注意的是,倾斜桨叶结构下包底有气体卷入,说明倾斜桨叶较易卷入空气。综上,在优化弱流区方面,桨叶叶数的效果优于桨叶倾角,且三叶桨效果较四叶桨更好。

KR 脱硫中铁水流动属于典型的湍流流动,湍动能作为表征湍流强度的关键参数,其数值大小直接反映流体动力学性能优劣。4种桨叶结构下铁水包流场轴向切面的湍动能分布如图6。图6表明:桨叶A结构下湍动能沿径向减小,致使桨叶附近湍

动能较大,约为 $2.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$,而其他区域湍动能较小,尤其是包壁与包底位置,湍动能不超过 $0.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$;与直叶桨相比,倾斜桨叶附近湍动能更大且递减幅度明显,这种效果有利于增强铁水的卷吸作用,使上部更多的脱硫剂下沉,提高铁水混合效果;相较于桨叶A(常规四叶桨),桨叶C(常规三叶桨)的湍动能分布变化较小,说明桨叶叶数对湍动能分布的影响与其对流场速度的影响基本一致,但常规三叶桨结构下流场整体湍动能高于常规四叶桨结构,下部弱流区湍动能也明显大于常规四叶桨结构,说明在改善弱流区湍动能方面,三叶桨优于四叶桨。

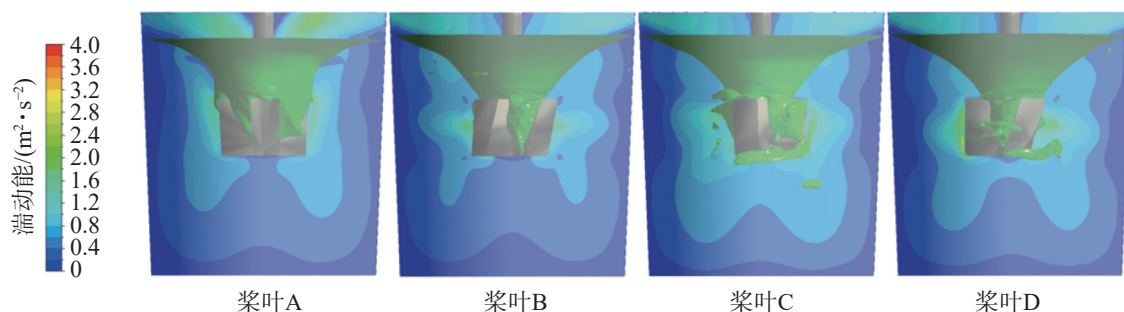


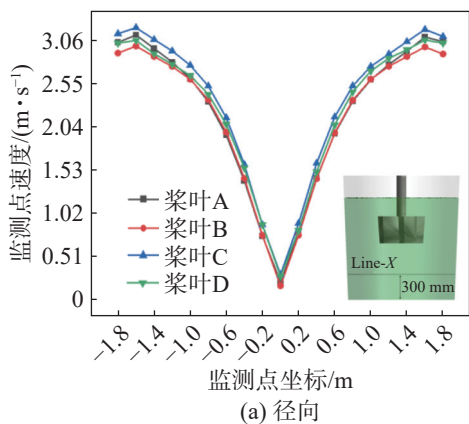
图6 不同桨叶结构下湍动能分布

Fig. 6 Turbulent kinetic energy distribution under different blade structures

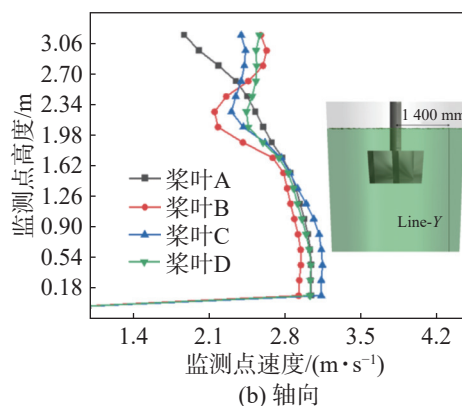
综上所述可知:三叶桨结构通过减少叶片数使相邻叶片间距增大,为铁水流动提供更充分的发展空间,从而形成更大的漩涡,有利于提升铁水流速,提高流场整体湍动能。因此,三叶桨结构的流体动力学性能显著优于常规四叶桨。

2.2 轴向速度与径向速度

为定量评估桨叶结构对KR混合效果的影响,对4种桨叶结构工况下铁水速度场进行统计分析,结果如图7。线X表示距离铁水包下底面800mm的水平线,线Y表示距离铁水包轴向中心线1400mm的垂线,分别表征径向和轴向速度分布特性。



(a) 径向



(b) 轴向

图7 径向和轴向监测点速度分布

Fig. 7 Velocity distribution at radial and axial monitoring points

由图7(a)可得:4种桨叶结构下,铁水径向速度均沿搅拌轴中心线对称分布,桨叶附近速度大于中心和包壁附近,说明桨叶倾角与叶数并未改变铁水包流场对称性分布特点;桨叶正下方的速度始终最小,依次为 $0.21, 0.17, 0.30, 0.28 \text{ m/s}$,且接近为零,这是因为铁水的旋转特性使桨叶正下方铁水流速最低,形成了弱流区,使得该区域脱硫反应困难,进而影响铁水的整体脱硫效果。对比桨叶正下方铁水流速可见,桨叶A与桨叶B及桨叶C与桨叶D下的铁水流

速差异较小, 但桨叶 C 与 D 结构下的铁水流速明显高于桨叶 A 与 B 结构, 说明三叶桨可以显著提升弱流区的铁水流速。4 种桨叶结构下线 X 相同位置处的铁水流速为: 桨叶 C>桨叶 D>桨叶 A>桨叶 B, 说明倾斜桨叶虽能增强铁水卷吸能力, 但对铁水包底部弱流区的改善效果较差。与四叶桨相比, 三叶桨更能提高铁水包下部动力学性能, 加快铁水流速, 缩小弱流区范围。

图 7(b) 表明: 随着 Y 值的增加, 线 Y 上的速度先减小后增大, 在 1.65~2.65 m 处为较低速度范围; 对比桨叶 A 与 B 发现 2 种结构桨叶下方的铁水流速差异较小, 但桨叶 B 结构桨叶附近铁水速度差较大, 说明倾斜桨叶可使桨叶附近铁水产生较大的速度差, 增强了铁水的对流, 有利于脱硫剂的卷入; 与桨叶 A 结构相比, 桨叶 C 结构下桨叶附近铁水速度差较大, 且桨叶下方的铁水流速更大, 说明三叶桨可在提高铁水卷吸能力的同时减小包底弱流区体积。

综上所述: 桨叶倾角与叶数均对铁水的混匀能力产生影响, 与直叶桨相比, 斜叶桨虽可增强铁水的卷吸能力, 但对弱流区的改善效果欠佳; 而与四叶桨相比, 三叶桨在提升铁水动力学性能上表现更优。

2.3 混匀时间

为表征铁水的流动性能, 采用标量混合方法研究铁水中脱硫剂的混匀时间。待铁水包内漩涡稳定后, 在注入点加入示踪剂并同步记录监测点 1 与监测点 2 处示踪剂质量分数随时间的变化情况, 所得结果如图 8。其中: 监测点 1 处于流场弱流区; 监测点 2 位于桨叶右侧。

由图 8(a) 可知: 相同时刻桨叶 A 结构下弱流区的示踪剂浓度高于其他桨叶结构, 且更快趋于稳定, 说明直四叶桨可使铁水包上部的铁水更快流至弱流区, 从而加快铁水混合, 提高铁水混匀效率。这是因为, 一方面, 相较于三叶桨, 四叶桨每旋转一周可推动铁水流动 4 次, 显著增强了铁水流动动量的传递, 同时叶数的增加可增强铁水径向流动, 促使铁水更有效地向铁水包底部扩散; 另一方面, 与斜四叶桨相比, 直四叶桨转动时可产生更强的离心力, 增加铁水径向运动的动能, 使得铁水撞击包壁后, 其动能更高效地转化为轴向运动的能量, 进而加强了铁水的上下环流。因此, 在桨叶 D 结构下, 弱流区的示踪剂浓度偏低, 且其浓度变化较慢趋于稳定。

由图 8(b) 可看出: 桨叶 B 结构下监测点 2 处示踪剂浓度较高且变化幅度较大。这是因为倾斜桨叶在转动时产生明显的轴向推力, 使铁水同时受到径

向和轴向作用而强制形成上下流动, 从而提升桨叶附近铁水流速; 同时桨叶倾斜导致铁水受到不对称的剪切力, 在浆液附近形成局部小漩涡并产生较高的速度梯度, 致使倾斜桨叶在搅拌桨附近产生局部快速混合的效果。设定监测点处混匀时间为标量浓度变化达到稳定状态 95% 时对应的时刻, 经计算得到不同桨叶结构下的混匀时间如表 3。由表 3 可知: 桨叶 A 结构时监测点 1 处的混匀时间最小, 相比桨叶 B、桨叶 C 及桨叶 D 结构分别缩短了 2.8%, 2.7%, 10.9%。上述 4 种桨叶结构下监测点 2 处的混匀时间均小于监测点 1 处, 说明桨叶附近铁水能更快达到混匀状态。

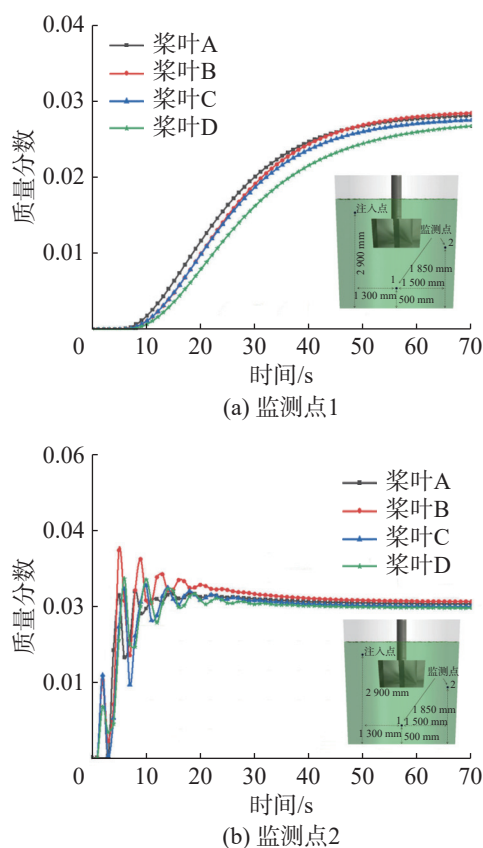


图8 监测点浓度变化特征

Fig. 8 Concentration variation characteristics of monitoring points

表 3 4 种工况下监测点的混匀时间 单位: s

Tab. 3 The mixing time of monitoring points under four working conditions Unit: s

| 监测点 | 桨叶 A | 桨叶 B | 桨叶 C | 桨叶 D |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 49.48 | 50.92 | 50.87 | 55.56 |
| 2 | 23.18 | 29.88 | 27.53 | 24.20 |

综上所述: 直叶桨能够提供更优的铁水整体混匀效果, 更适合铁水包全域混合的需求; 而斜叶桨则

在局部快速混合方面表现出显著优势。此外,四叶桨在提升铁水混匀效率方面整体优于三叶桨,这主要得益于其增强的动量传递和径向流动特性。

2.4 脱硫剂分布

铁水包底部脱硫剂的分布是影响KR脱硫混合效果的主要因素之一,由于搅拌桨的旋转特性,其会在桨叶附近形成强制涡流区,导致脱硫剂在桨叶附近产生团聚现象,造成铁水包底部脱硫剂占比偏小且其分散范围相应变小,进而减小了脱硫剂与铁水的有效接触面积。这一变化降低了脱硫剂的使用效率,并最终影响脱硫效果。以桨叶A结构为例,分析搅拌过程中脱硫剂在铁水中的分布状态,其相关变化情况如图9。

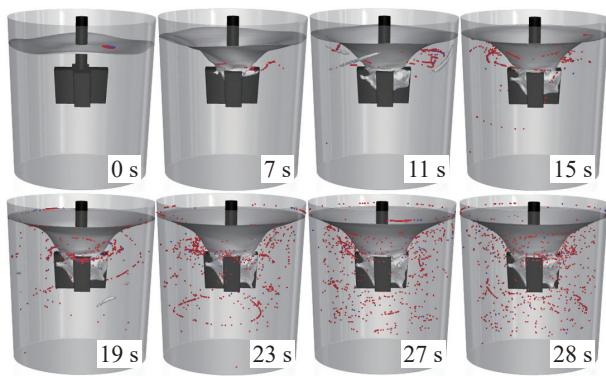


图9 脱硫剂分散随时间变化的过程

Fig. 9 Dynamics of desulfurizer dispersion over Time

由图9可知:搅拌桨转动时从铁水液面处加入的脱硫剂颗粒初始作为连续相存在于气液交界面,仅少量被卷入铁水;随着搅拌作用的增强,被卷入的颗粒逐渐增多并部分开始下沉至铁水包底部,最终达到动态平衡;27,28s时铁水包内脱硫剂分布状态趋于稳定,表明28s后脱硫剂与铁水整体达到动态平衡,该分散过程与物理模拟结果吻合良好。值得注意的是,动态平衡后铁水包上部桨叶附近出现明显的脱硫剂团聚现象,导致大量脱硫剂聚集在铁水包上部区域,而底部约1/3区域脱硫剂显著偏少,该区域脱硫效果较差,这也是工业生产中脱硫剂利用率较低的主要原因之一。为进一步分析桨叶结构对脱硫剂颗粒在铁水包中分布情况的影响,以 $Y=1\ 525$, $2\ 625$ mm平面为分界面将铁水包计算域分为3个区域(区域I,II,III),统计不同桨叶结构下不同区域的颗粒分布,结果如图10。

由图10可看出:不同工况下(桨叶A,B,C,D)区域III的颗粒占比始终最小,依次为14.81%,9.48%,7.16%,7.48%,说明铁水包内脱硫剂分布不均,尤其是包底部脱硫剂分布效果较差。与桨叶C工况相

比,桨叶A工况下区域II颗粒占比差异较小,但区域I颗粒占比减少,而区域III颗粒占比提高了2倍左右,说明直四叶桨能有效将表面更多的脱硫剂输送至包底,增强混合效果。结合混匀时间分析可知:直叶桨旋转时产生的强力径向流能强化铁水上下循环,为脱硫剂提供持续的向下惯性力,从而克服脱硫剂因密度低产生的较大浮力;而斜叶桨虽局部增强铁水轴向流动,但桨叶附近脱硫剂受铁水阻力难以继续下沉,导致包底部脱硫剂含量较低。对比4种工况发现,倾斜桨叶下区域II颗粒占比明显较高,证实其卷吸作用更强(与上文流场分析一致),但易导致脱硫剂在桨叶附近团聚,影响铁水包整体脱硫效率。综合分析表明,直四叶桨能有效促进脱硫剂颗粒下沉运动,改善底部颗粒分布,提升整体混合效果,有利于KR脱硫反应。

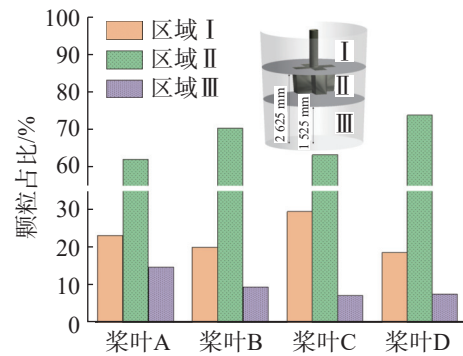


图10 不同桨叶结构下颗粒分布

Fig. 10 Particle distribution under different blade structures

3 结论

设计4种利于工业实现的桨叶结构(直四叶桨A、斜四叶桨B、直三叶桨C、斜三叶桨D)以改善KR脱硫混合效果,通过数值模拟研究不同桨叶结构对KR脱硫混合效果的影响,得到如下主要结论:

1) 斜叶桨较直叶桨更能增强铁水轴向运动,提升铁水卷吸能力,但对弱流区的改善能力较弱。而三叶桨相比于四叶桨,对铁水的轴向运动作用更明显,铁水流场速度更大,进而通过强化铁水动力学性能而显著缩小弱流区范围。同时,桨叶叶数在改善弱流区方面优于桨叶倾角因素。

2) 结合示踪剂扩散数据发现,斜叶桨具有局部快速混合的优势,而直叶桨更适合铁水包整体混合的需求。在转速90 r/min时,直四叶桨的混匀时间为49.48 s,较斜四叶桨与直三叶桨分别缩短了2.8%,2.7%。因此,采用直四叶桨不仅可以有效缩短铁水

混匀时间,还能提升铁水混合效果。

3) 铁水包底部约 1/3 区域的脱硫剂分散效果最差,是改善脱硫效果的重要区域。与直叶浆相比,斜叶浆因卷吸作用较强易造成脱硫剂团聚现象,而且直四叶浆底部脱硫剂占比约为斜四叶浆的 2 倍。因此,直四叶浆更有利于固液混合,提高 KR 脱硫混合效果。

参考文献:

- [1] VISURI V V, VUOLIO T, HAAS T, et al. A review of modeling hot metal desulfurization[J]. *Steel Research International*, 2020, 91(4):1900454.
- [2] UESHIMA N, MAEDA T, OIKAWA K. Effect of Cu addition on precipitation and growth behavior of MnS in silicon steel sheets[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, 48(8):3843–3851.
- [3] 潘宏伟, 张仕骏, 单庆林, 等. 唐钢新区铁水 KR 高效脱硫的工业试验研究 [J]. *特殊钢*, 2023, 44(1):25–29.
PAN H W, ZHANG S J, SHAN Q L, et al. Industrial experiment study on hot metal KR highly efficient desulfurization at tangsteel new plant[J]. *Special Steel*, 2023, 44(1):25–29.
- [4] GAO P, ZHU G S, WANG F, et al. Kinetic mechanism and process optimization of hot metal desulfurization pretreatment[J]. *ISIJ International*, 2022, 62(6):1061–1069.
- [5] 朱仁林, 李建立, 沈家豪, 等. KR 脱硫渣高温矿物组成及含硫相的析出行为 [J]. *钢铁*, 2021, 56(11):72–77,86.
ZHU R L, LI J L, SHEN J H, et al. Mineral composition of KR desulfurization slag and precipitation behavior of sulfur-containing phases[J]. *Iron & Steel*, 2021, 56(11):72–77,86.
- [6] 朱仁林, 李建立, 余岳, 等. 硫含量对 KR 脱硫渣中硫赋存状态的影响 [J]. *钢铁*, 2022, 57(2):54–62.
ZHU R L, LI J L, YU Y, et al. Effect of sulfur content on occurrence state of sulfur in KR desulfurization slag[J]. *Iron & Steel*, 2022, 57(2):54–62.
- [7] 张桢凯, 赵俊学, 王泽, 等. 转炉双渣法冶炼炉渣成分、性能及炉温的匹配 [J]. *钢铁*, 2024, 59(4):57–65.
ZHANG Z K, ZHAO J X, WANG Z, et al. Matching of slag composition, performance and furnace temperature based on double slag process[J]. *Iron & Steel*, 2024, 59(4):57–65.
- [8] 朱苗勇. 现代冶金学:钢铁冶金卷 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
ZHU M Y. *Modern Metallurgy: Volume of Iron and Steel Metallurgy*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.
- [9] 王海风, 平晓东, 周继程, 等. 中国钢铁工业绿色发展回顾及展望 [J]. *钢铁*, 2023, 58(2):8–18.
WANG H F, PING X D, ZHOU J C, et al. Review and prospect of green development for Chinese steel industry[J]. *Iron & Steel*, 2023, 58(2):8–18.
- [10] ZHAO Y Y, CHEN W, CHENG S S, et al. Mathematical simulation of hot metal desulfurization during KR process coupled with an unreacted core model[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2022, 29(4):758–766.
- [11] MEHDI M, HE Y L, HILINSKI E J, et al. Non-oriented electrical steel with core losses comparable to grain-oriented electrical steel[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, 491:165597.
- [12] WANG L F, YU Q C, YIN S B, et al. A study on the effect of ladle structures and stirrer positions on the internal flow field in the hot metal desulfurization process[J]. *Metals*, 2025, 15(1):90.
- [13] 郑晓娜. 硫含量对无取向硅钢夹杂物特性及钢性能的影响 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2024.
ZHENG X N. Effect of Sulfur Content on Inclusion Characteristics and Steel Properties in Non-oriented Silicon Steel[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2024.
- [14] JIA S Y, HE Z, OUYANG D G, et al. Powder injection effect on hot metal desulfurization behavior in the kanbara reactor: a transient 3D coupled numerical model[J]. *ISIJ International*, 2022, 62(3):449–456.
- [15] WU S W, YANG J, ZHANG R H, et al. Prediction of endpoint sulfur content in KR desulfurization based on the hybrid algorithm combining artificial neural network with SAPSO[J]. *IEEE Access*, 2020, 8:33778–33791.
- [16] 申晓阳, 李强, 郭帅, 等. KR 预处理工艺参数对脱硫剂分散行为的影响 [J]. *材料与冶金学报*, 2022, 21(2):109–116.
SHEN X Y, LI Q, GUO S, et al. Effect of operating parameters on dispersion behavior of desulfurization reagent particles for KR pretreatment process[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2022, 21(2):109–116.
- [17] 秦利国. 石灰基料为 KR 脱硫剂脱硫理论实践分析 [J]. *中国高新科技*, 2024(18):90–92.
QIN L G. Theoretical and practical analysis of using lime based material as KR desulfurizer for desulfurization[J]. *China High-Tech*, 2024(18):90–92.
- [18] 王鑫, 张飞, 刘泳, 等. 浸入式喷吹铁水包内多相流行为与反应动力学 [J]. *炼钢*, 2024, 40(2):23–30.
WANG X, ZHANG F, LIU Y, et al. Multiphase flow behavior and reaction kinetics in hot metal ladle with submerged injection[J]. *Steelmaking*, 2024, 40(2):23–30.
- [19] HE M L, WANG N, CHEN M, et al. Distribution and motion behavior of desulfurizer particles in hot metal with mechanical stirring[J]. *Powder Technology*, 2020, 361:455–461.

- [20] 赵艳宇, 蔡新雨, 刘力刚, 等. KR 过程铁水包底部倾斜对铁水混匀现象影响的水模型研究 [J]. *炼钢*, 2022, 38(3):1-5.
ZHAO Y Y, CAI X Y, LIU L G, et al. Water modeling of the influence of bottom inclination on the mixing phenomena in KR process[J]. *Steelmaking*, 2022, 38(3):1-5.
- [21] 李忠慧. KR 搅拌过程数值模拟与搅拌头用耐火浇注料性能研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2023.
LI Z H. Numerical Simulation of KR Stirring Process and Research on Properties of Refractory Castables for Stirrer Heads [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2023.
- [22] SHAO P, ZHANG T A, ZHANG Z M, et al. Numerical simulation on gas-liquid flow in mechanical-gas injection coupled stirred system[J]. *ISIJ International*, 2014, 54(7):1507-1516.
- [23] 李威, 熊凌, 罗钟邱, 等. 基于加权聚类和 DNN 的 KR 法脱硫剂加入量预报模型 [J]. *炼钢*, 2025, 41(1):12-18,44.
LI W, XIONG L, LUO Z Q, et al. Prediction model for desulfurizer addition for KR process based on weighted clustering and DNN[J]. *Steelmaking*, 2025, 41(1):12-18,44.
- [24] 陈国俊, 刘晓峰, 王举金, 等. 精炼渣中 $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 对钢液脱硫的影响 [J]. *钢铁*, 2025, 60(3):78-85,94.
CHEN G J, LIU X F, WANG J J, et al. Effect of $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ in refining slag on steel desulfurization[J]. *Iron & Steel*, 2025, 60(3):78-85,94.
- [25] 晏颖, 孙伟, 贾舒渊, 等. KR 法中桨叶结构对搅拌效率影响的数值模拟研究 [J]. *炼钢*, 2023, 39(6):8-14,29.
YAN Y, SUN W, JIA S Y, et al. Numerical simulation of the effect of blade structure on mixing efficiency in KR method[J]. *Steelmaking*, 2023, 39(6):8-14,29.
- [26] 贾舒渊, 王强, 贺铸, 等. 桨叶结构对 KR 脱硫搅拌效果影响的数值模拟 [J]. *钢铁研究学报*, 2021, 33(11):1134-1143.
JIA S Y, WANG Q, HE Z, et al. Numerical simulation of effect of blade structure on KR desulfurization stirring[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2021, 33(11):1134-1143.
- [27] 纪俊红, 江禹, 杜鸿贤, 等. 桨叶形状对 KR 法脱硫混合行为影响的数值模拟 [J]. *钢铁研究学报*, 2022, 34(5):451-460.
JI J H, JIANG Y, DU H X, et al. Numerical simulation of influence of impellers' shape on mixing behavior by KR method desulfurization[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2022, 34(5):451-460.
- [28] 周剑丰, 彭家云, 成志强, 等. KR 搅拌铁水脱硫水模型试验研究 [J]. *炼钢*, 2022, 38(5):10-15.
ZHOU J F, PENG J Y, CHENG Z Q, et al. Study on water model test of KR stirred hot metal desulfurization[J]. *Steelmaking*, 2022, 38(5):10-15.
- [29] BUSCIGLIO A, CAPUTO G, SCARGIALI F. Free-surface shape in unbaffled stirred vessels: experimental study via digital image analysis[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 104:868-880.
- [30] LEE Y J, YI K W. Improvement of desulfurization efficiency via numerical simulation analysis of transport phenomena of kanbara reactor process[J]. *Metals and Materials International*, 2022, 28(4):1026-1037.

责任编辑: 何莉