

唐钢新区铁水 KR 高效脱硫的工业试验研究

潘宏伟^{1,3}, 张仕骏¹, 单庆林¹, 路博勋¹, 张贺君², 肖鹏程^{3,4}, 邝霜¹

(1 河钢唐钢技术中心, 唐山 063000; 2 河钢集团唐钢公司热轧事业部, 唐山 063600,

3 河北省高品质钢连铸技术研究中心, 唐山 063000, 4 华北理工大学冶金与能源学院, 唐山 063210)

摘要: 通过在唐钢新区 200 t 铁水包中取样, 研究了 KR 脱硫过程中铁水中[S]和脱硫渣中(S)含量的变化规律。结果表明, 在 KR 10 min 的机械搅拌过程中, 铁水硫从初始 0.038% 下降到 0.002%, 脱硫渣(S)从初始 0.028% 上升到 3.28%。脱硫率从初始 68% 下降到 33%。KR 脱硫的限制性环节在后期的 7~10 min, 这是目前仍尚未明确的问题。为了提高 KR 处理过程末段脱硫效率, 采用了阶跃式变化搅拌速度的工艺思路, 并开展工业试验, 在不增加搅拌时间的情况下, 搅拌速度从 90~110 r/min 降低至 45~90 r/min, 脱硫剂用量从 8~10 kg/t 降至 4.0~6.5 kg/t。阶跃控制搅拌速度的 KR 脱硫模式, 在实际生产中具有较强的应用价值。

关键词: 铁水 KR 机械搅拌; 脱硫模式; 阶跃式搅拌速度; 高效脱硫

Industrial Experiment Study on Hot Metal KR Highly Efficient Desulfurization at Tangsteel New Plant

Pan Hongwei^{1,3}, Zhang Shijun¹, Shan Qinglin¹, Lu Boxun¹,

Zhang Hejun², Xiao Pengcheng^{3,4}, Kuang Shuang¹

(1 R&D Center, HBIS Tangsteel, Tangshan 063000; 2 Hot Rolling Division of Tangsteel Co., Ltd., He Steel Group, Tangshan 063600; 3 Hebei Engineering Research Center of High Quality Steel Continuous Casting, Tangshan 063000;

4 College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210)

Abstract: During KR desulfurization process, the variation of [S] in hot metal and (S) in desulfurization slag is studied accordingly by sampling in the 200 t hot metal ladle at Tangsteel new plant. It shows that, during the 10 minutes of KR stirring process, the sulfur in hot metal decrease from initial 0.038% to 0.002%, and the sulfur in desulfurization slag is increasing from initial 0.028% to 3.28%. while the desulfurization rate keeps decreasing from 68% to 33%. So the limiting link of KR desulfurizing happens at the last 7 to 10 minutes, which not clear in many studies at present. In order to improve the desulfurizing efficiency for the last few minutes, step-changing stirring speed is adopted and applied for the practical industry experiments, the stirring speed decrease from 90-110 r/min to 45-90 r/min, and then the amount of desulfurizer can be reduced from 8-10 kg/t to 4.0-6.5 kg/t without increasing stirring time. So this kind of KR desulfurization model of step-changing stirring speed and immerge depth of impeller has a potential application value for practical industry production.

Key Words: Hot Metal KR Mechanical Stirring; Desulfurization Model; Step-Changing Stirring Speed; Highly-Efficient Desulfurizing

高级别钢种对铁水硫含量的要求越来越严格, 需要通过铁水预处理实现高效低硫控制。KR(机械搅拌铁水脱硫法)搅拌脱硫是目前成本低、效率高的铁水脱硫工艺, 是脱硫工艺的重要发展方向^[1-2]。有研究表明 KR 脱硫渣仍具有 70% 的回收利用价值^[3], 说明脱硫渣利用不充分是国内外的行业共性问题。许多学者从模拟的角度开展了大量研究工作, 通过数值模拟揭示了 KR 搅拌脱硫工艺的流体

流动行为和颗粒运动行为^[4-7], 为 KR 搅拌设备的结构设计和脱硫工艺的改进提供了参考; 通过水模型试验揭示搅拌浆转速和浸入深度对搅拌效果的影响^[8], 指出了铁包内流动状态量化评价的复杂性。另有学者进行了渣-金反应的实验室研究, 指出渣中成分(如 MgO^[9]、Al₂O₃、TiO₂^[10]、CaS 和 CaSO₄^[11])含量及脱硫剂聚集行为状态^[12-14]对脱硫效果的影响, KR 脱硫过程固态石灰与液渣对脱硫的影响, 指

基金项目: 河北省创新能力提升计划项目(20567696H), 河北省“三三三人才工程”资助项目(A202102002),

唐山市人才资助项目(A202010004)

作者简介: 潘宏伟(1984-), 男, 高级工程师, 博士; E-mail: 13426249084@163.com; 收稿日期: 2022-07-27

出了液态渣是脱硫的限制性环节。宁钢从脱硫剂输送方式的角度提出了降低消耗的措施^[15],并在现场得到应用。首钢^[16]、马钢^[17]等企业主要从成本控制的角度,指出了 KR 工艺的低成本优势。

综上所述,目前国内外研究学者侧重于实验室的 KR 脱硫研究或者成本管控,在实际生产中 KR 脱硫过程的定量评价,尚未引起诸多学者的关注,其主要原因是现场生产环境复杂、取样困难,单独组织试验的难度大、成本高。为了在实际生产中探索进一步提高 KR 脱硫效率、降低脱硫剂消耗的工艺,唐

钢在 200 t 铁水包开展 KR 脱硫工艺的过程研究,分析 KR 搅拌过程铁水中[S]含量、脱硫渣中(S)含量的变化规律,找出进一步提高 KR 脱硫效率、降低脱硫剂消耗的途径。

1 KR 工艺指标

唐钢新区的炼钢铁水供应采用“一包到底”工艺,配备 3 座 200 t KR 脱硫站,其主要设备参数如表 1 所示。KR 进站铁水平均 S 含量 0.038%、平均 Si 含量 0.39%、平均温度 1 365 °C;属于高硅低温铁

表 1 唐钢新区 200 t KR 工艺参数

Table 1 Process parameters of 200 t KR at Tanggang new plant

搅拌桨	搅拌桨转速/(r·min ⁻¹)	脱硫剂	搅拌时间/min	平均脱硫剂消耗/(kg·t ⁻¹)	温降/°C	铁损/%
四叶桨	90~120	CaO+CaF ₂	10	8~10	30	≤0.5

水,脱硫难度大,脱硫剂消耗仍有降低空间。

2 KR 工艺存在的不足

为了进一步提升 KR 脱硫效率,需要摸清当前 KR 搅拌脱硫过程的限制性环节。当前 KR 搅拌过程搅拌头以恒定浸入深度、恒定转速为主,如图 1。转速在 90~120 r/min,插入深度固定在 1 500 mm。按照钢种对硫含量的要求进行适度脱硫,脱硫炉次的平均脱硫率为 50%~95%,脱硫率仍有进一步提

升空间。

为了量化评价当前 KR 脱硫过程存在的不足,重点对 KR 搅拌过程铁水中[S]含量和渣中(S)含量进行研究。对铁水和脱硫渣进行同步取样,取样时间节点如图 2 所示。在 KR 搅拌 10 min 过程,平均间隔 2~3 min 进行取样。

在 200 t 铁水包进行 KR 搅拌过程的取样,铁水进出站的温度分别为 1 358 °C、1 325 °C,脱硫剂加

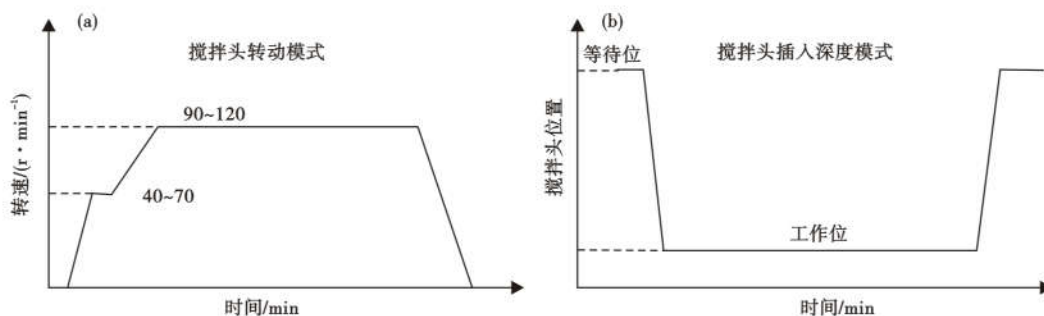


图 1 原 KR 搅拌模式示意图:(a)转速;(b)搅拌头位置

Fig. 1 Schematic diagram of original KR stirring mode: (a) stirring speed; (b) stirring head position

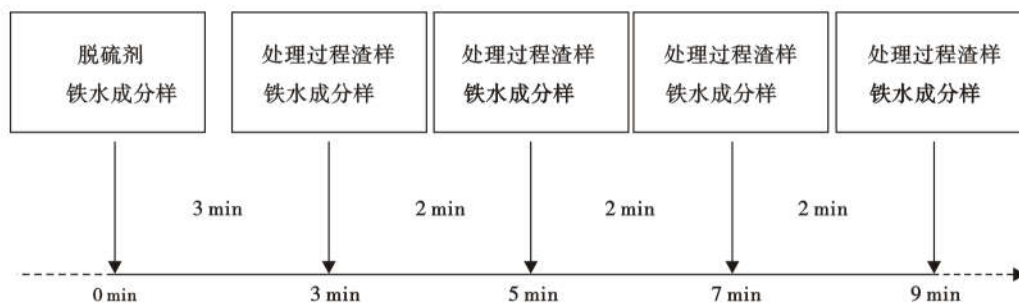


图 2 KR 过程取样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of KR process sampling

入量 10.3 kg/t, 搅拌头寿命为 171 次, 按照图 2 所示的节点进行取样。基于试验炉次的取样结果, 铁水初始、脱硫结束时 [S] 含量分别为 0.038%、0.002%, 整体脱硫率约为 95%。渣中初始、结束 (S) 含量分别为 0.028%、3.28%, 结果如图 3 所示。由图 3 可见, 在 KR 搅拌前 3 min, 铁水中 [S] 含量急剧降低, 后期 [S] 含量缓慢降低, 说明 KR 脱硫的限制性环节在搅拌过程的中后期。渣中 (S) 含量总体上呈现先快速上升, 然后上升速率有所减缓。

整个 KR 搅拌过程, 初期 3 min 脱硫率最高, 约为 68%; 末期脱硫率最低, 约为 33%。再一次说明, 整个脱硫的限制性环节在搅拌中后期的 3 ~ 10 min, 特别是末期的 2 ~ 3 min, 结果如图 4 所示。

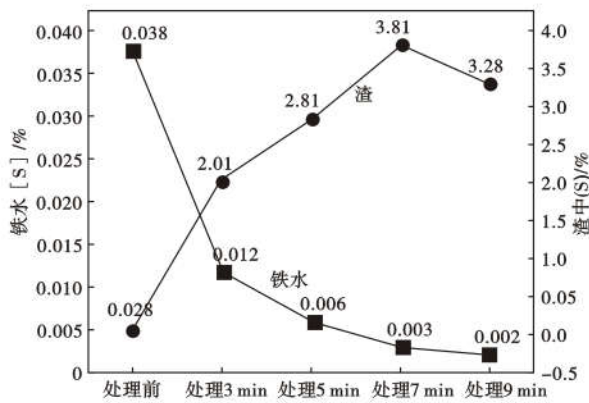


图 3 原 KR 搅拌过程铁水中 [S] 和渣中 (S) 的变化规律 / %
Fig. 3 Variation Law of [S] in molten iron and (s) in slag during original KR stirring process / %

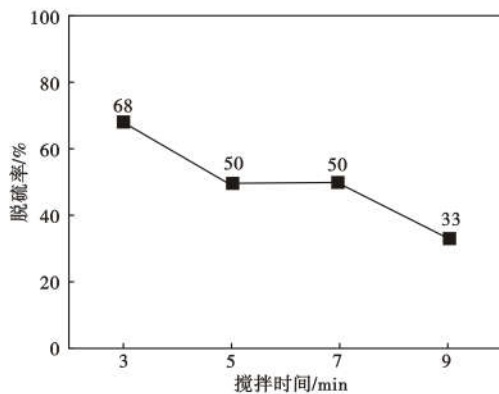


图 4 原 KR 搅拌过程脱硫率的变化规律 / %
Fig. 4 Variation Law of desulfurization rate in original KR stirring process / %

3 KR 脱硫工艺优化的工业试验

针对在搅拌过程的初期 3 min, 脱硫效率能否进一步提高的问题, 以及如何提高搅拌中后期 (3 ~ 10 min) 的脱硫效率, 在 200 t 铁包里开展了 KR 搅

拌工艺优化的工业试验研究。在原始搅拌模型中, 搅拌头以恒定浸入深度、恒定转速为主, 铁包内流场趋于稳定, 混合效果较差, 不利于脱硫反应进行。通过实验室模拟不同转速下特征位置 (铁水高度中心、搅拌桨边缘与包壁连线中点) 铁水流速如图 5 所示, 搅拌桨在 30 ~ 110 r/min 转速下特征位置铁水流速有较大差异, 可预见不同转速下铁包内流场同样存在较大差异, 由此设计搅拌过程变速试验, 利用不同转速造成的流场变化提升混匀效果, 进一步提升脱硫反应效率。试验主要侧重于研究搅拌头不同转速模式、不同脱硫剂消耗量对 KR 脱硫效率的影响。

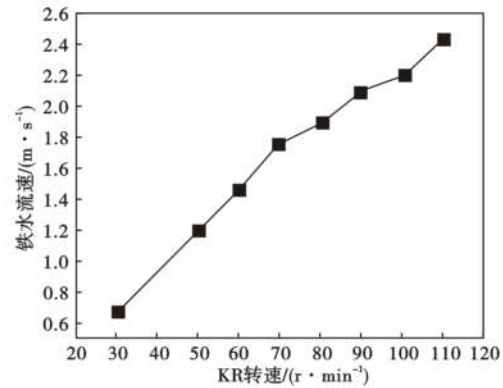


图 5 原 KR 转速下特征位置对铁水流速的影响
Fig. 5 Effect of original KR stirring speed on velocity of molten iron at characteristic position

3.1 KR 搅拌全过程变转速的试验研究

基于 KR 整个搅拌过程转速的间断式变化, 实现对铁包内流场的持续扰动, 打破铁包内铁水的有序流动, 提高铁水与脱硫剂混合效果。因此, 针对 200 t 铁水包, 开展了搅拌头变转速的工业试验, 转速变化如图 6 所示。脱硫剂消耗约为 13 kg/t, 整个

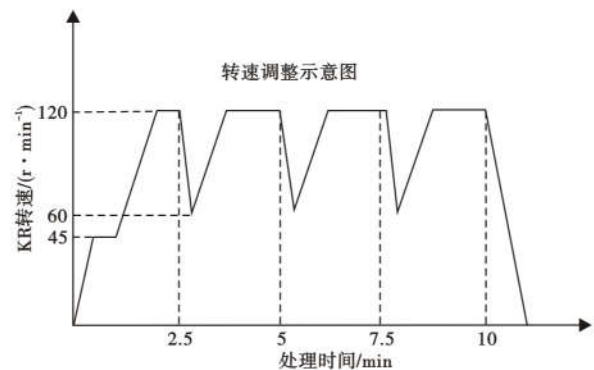


图 6 KR 全过程变转速搅拌模式的示意图
Fig. 6 Schematic diagram of variable speed mixing mode in whole process of KR

搅拌时间约为 10 min, 并按照图 2 所示进行取样。

试验结果表明, 整个 KR 搅拌前期的 4 min, 通过变转速的方式打破铁水包内铁水的有序流动, 不能提高脱硫效率, 反而降低了脱硫效率。在前 4 min 铁水中 [S] 从 0.141% 降低至 0.076%, 如图 7 所示; 对应的前期脱硫率仅为 46%, 如图 8 所示, 较不改变转速条件下的 68% 的脱硫率 (如图 4), 效果明显变差。且整体脱硫效果仅为 84%, 说明 KR 全过程变转速模式下, 不利于前期快速脱硫, 同时影响整个中后期的脱硫效率, 其后期的脱硫率仅 30% ~ 38% (如图 8)。其主要原因是, 前期变转速的低转速阶段恶化了脱硫效果。

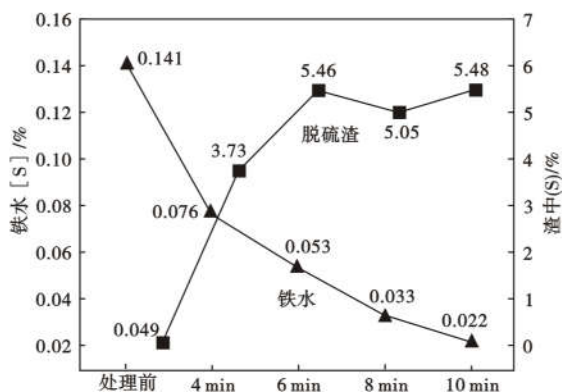


图 7 连续变转速时 [S] 和 (S) 的变化规律/%

Fig. 7 Variation Law of [S] and (S) during continuous variable speed process/%

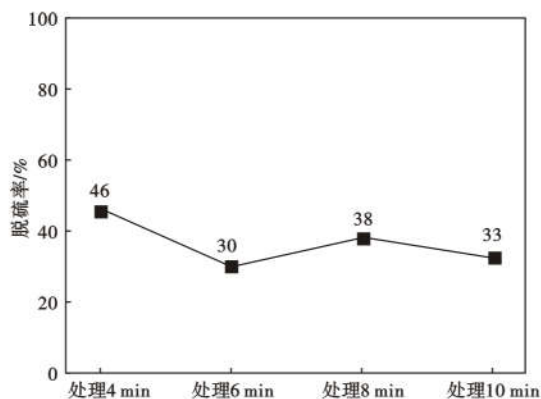


图 8 连续变转速时过程脱硫率的变化规律/%

Fig. 8 Variation Law of desulfurization rate during continuous variable speed/%

3.2 KR 搅拌中后期变转速的试验研究

在 KR 搅拌过程的前期变化转速恶化脱硫效果, 鉴于此, 如图 9 所示, 在 KR 搅拌过程的中后期变转速, 转速脉冲式地降低至最高转速的 50%。其处理过程铁水与渣中 S 元素变化趋势如图 10 所示,

经折算处理过程脱硫率如图 11 所示, 较原有模型新模型在处理中后期脱硫率有明显提升。开展 2 种不同脱硫剂消耗条件下的工业试验。脱硫剂加入量分别为 6.5 kg/t、4.0 kg/t。期间, 为了验证 4.0 kg/t 条件下的脱硫效果, 进行了验证性重复试验。对脱硫前后的铁水进行取样, 试验结果如图 12 所示, 在脱硫剂消耗为 6.5 kg/t 时, 脱硫率为 89%; 在脱硫

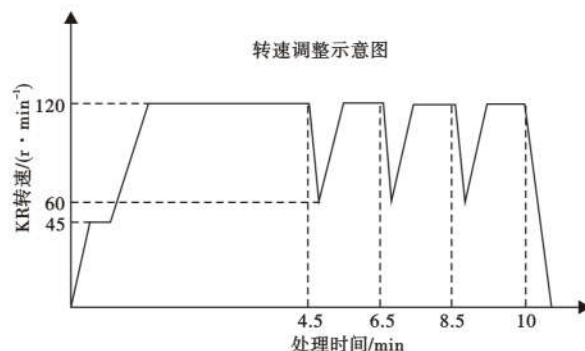


图 9 KR 中后期变转速搅拌模式的示意图

Fig. 9 Schematic diagram of variable speed mixing mode in the middle and later stage of KR

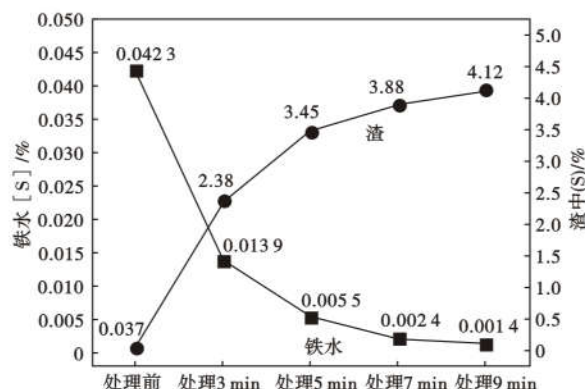


图 10 新模型处理过程 [S] 和 (S) 的变化规律/%

Fig. 10 Change law of [S] and (S) in new model treatment process/%

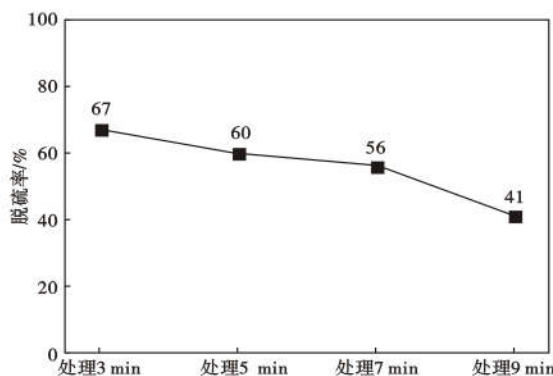


图 11 新模型处理过程脱硫率的变化规律/%

Fig. 11 Variation law of desulfurization rate in new model treatment process/%

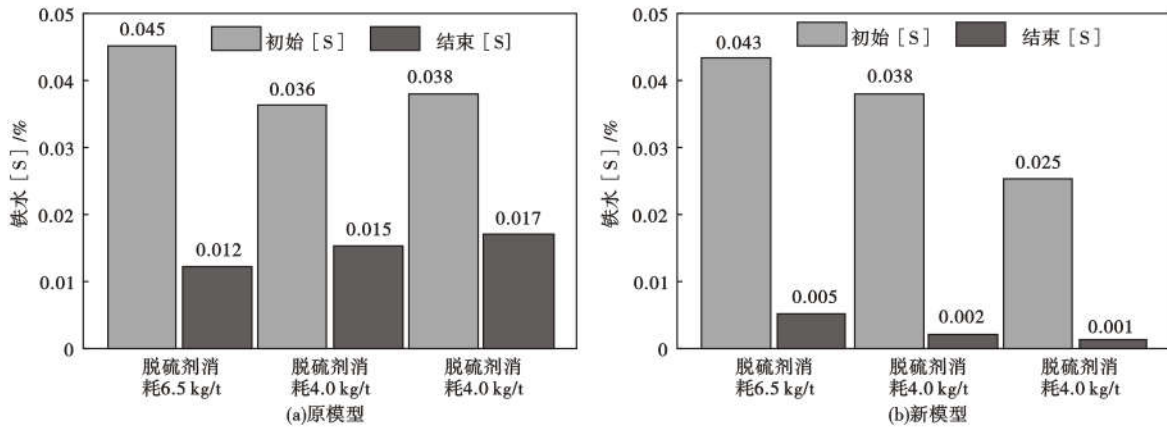


图 12 (a)原模型和(b)新模型铁水脱硫剂消耗量和脱硫率的变化规律

Fig. 12 Variation law of hot metal desulfurizer consumption and desulfurization rate by (a) original model and (b) new model

剂消耗为 4.0 kg/t 时,脱硫率为 95%、96%。较 KR 搅拌过程的前期变化转速的脱硫率 84%,提升效果明显。新型搅拌模型充分利用了非稳态流场对铁水、脱硫剂两相的混匀的提升作用,并针对性的在铁水 S 高、脱硫剂在渣中占比较高两者接触概率大的处理前期维持高转速,在铁、渣物质交换效果差的处理中后期增大变速频率,最终使脱硫剂利用率得到大幅提高,进而促进了脱硫反应的进行。

4 结论

(1) 整个 KR 搅拌过程的脱硫率存在明显差异。针对 200 t 铁水 KR 处理,初期 3 min 脱硫率最高,约

为 68%;末期 2~3 min 脱硫率最低,约为 33%,是 KR 脱硫工艺的限制性环节。

(2) KR 采用全流程变转速的工艺,不利于脱硫效果的提高,平均脱硫率由 95% 降低至 84%。

(3) 由工业试验结果表明,在 KR 脱硫过程的中后期 7~10 min,采用阶跃变转速的工艺,脱硫剂量可由 8.0~10 kg/t 降低至 4.0~6.5 kg/t, KR 结束铁水中 S 含量降低至 0.001%~0.005%,在脱硫剂用量大幅降低条件下,脱硫率仍可稳定控制在 95% 以上。

参考文献

- [1] 欧阳德刚,王庆方,刘守堂,等. KR 脱硫搅拌器的技术现状与发展方向[J]. 武钢技术, 2005(5): 58-62.
- [2] 张茂林,徐安军. KR 法与喷吹法在铁水脱硫中应用的比较[J]. 炼钢, 2009, 25(5): 73-77.
- [3] Nakai Y, Kikuchi N, Iwasa M, et al. Development of Slag Recycling Process in Hot Metal Desulfurization with Mechanical Stirring[J]. Steel Research International, 2009, 80(10): 727-732.
- [4] 程新德,孙江龙,周家健,等. KR 法铁水脱硫的流动数值模拟分析[J]. 武汉科技大学学报, 2015, 38(5): 330-335.
- [5] 闵昌飞,但斌斌,牛清勇,等. 挡板改善 KR 法脱硫搅拌效果的数值分析[J]. 武汉科技大学学报, 2020, 43(5): 340-345.
- [6] Lou W, Wang X, Liu Z, et al. Numerical Simulation of Desulfurization Behavior in Ladle with Bottom Powder Injection[J]. ISIJ International, 2018, 58(11): 2042-2051.
- [7] 王坤,刘燕,张延安. 底吹-机械搅拌耦合铁水脱硫的模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(6): 818-822.
- [8] 董佳鹏,张立峰,赵艳宇,等. KR 法铁水脱硫过程铁水混合现象的水模型[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(2): 103-109. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20200117.
- [9] Cho M K, Cheng J, Park J H, et al. Hot Metal Desulfurization by CaO-SiO₂-CaF₂-Na₂O Slag Saturated with MgO[J]. ISIJ International, 2010, 50(2): 215-221.
- [10] Dong K, Long W U, Liu W J, et al. Desulfurization of CaO-Al₂O₃-SiO₂-TiO₂ Slag System[J]. ISIJ International, 2014, 54(10): 2248-2254.
- [11] Matsui A, Uchida Y I, Kikuchi N, et al. Effects of Temperature and Oxygen Potential on Removal of Sulfur from Desulfurization Slag[J]. Tetsu-to-Hagane, 2016, 102(10): 553-559.
- [12] Nakai Y, Sumi I, Kikuchi N, et al. Aggregation Behavior of Desulfurization Flux in Hot Metal Desulfurization with Mechanical Stirring[J]. ISIJ International, 2013, 53(8): 1411-1419.
- [13] Nakai Y, Sumi I, Kikuchi N, et al. Powder Blasting in Hot Metal Desulfurization by Mechanical Stirring Process[J]. ISIJ International, 2017, 57(6): 1029-1036.
- [14] Takahashi K, Utagawa K, Shibata H, et al. Influence of Solid CaO and Liquid Slag on Hot Metal Desulfurization[J]. Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan, 2012, 52(1): 10-17.
- [15] 喻同信,马星火,何腾,等. 降低 KR 脱硫剂单耗试验[J]. 中国冶金, 2017, 27(9): 35-37.
- [16] 孙亮,朱良,赵晓东. 3 种铁水脱硫工艺的应用实践[J]. 中国冶金, 2018, 28(3): 50-53.
- [17] 吴明,李应江. 单喷、复喷、KR 法脱硫工艺在马钢的实践分析[J]. 中国冶金, 2008, 18(12): 5.