

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.06.012

底吹-机械搅拌耦合铁水脱硫的模拟

王 坤, 刘 燕, 张延安

(东北大学 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对底吹-机械搅拌耦合铁水预处理脱硫的气体与熔体的相互作用过程, 利用 CFD 商业软件 Fluent 15.0 和物理模拟的方法, 针对某钢厂 120 t 底吹钢包脱硫过程进行实验研究, 并从流场、气体体积分布等方面研究了搅拌桨结构、搅拌转速、通气流量、偏心度对铁水包内钢液混合效果的影响. 结果表明: 使用 SSB-D 桨, 搅拌转速 200 r/min, 通气流量为 1.5 m³/h, 偏心度 0.4 时, 熔池内的流场分布得更均匀, 镁蒸气气泡在铁水中更加分散和细化, 增加了镁蒸气与铁水的气液接触面积, 提高了镁蒸气的脱硫效率.

关 键 词: 底吹; 机械搅拌; 气泡微细化; 脱硫; 数值模拟

中图分类号: TQ 028.17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)06-0818-05

Simulation on Desulfurization of Molten Iron with Bottom Blown-Mechanical Stirring Coupled

WANG Kun, LIU Yan, ZHANG Ting-an

(Key Laboratory of Ecological Metallurgy of Multi-metal Intergrown Ores of Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Yan, E-mail: shanqibao2000@163.com)

Abstract: To understand the interaction between bubble and melt in desulfurization of hot metal pretreatment with bottom blown-mechanical stirring coupled, the CFD commercial software Fluent 15.0 and physical simulation method were used to study on desulfurization process of 120 t bottom blown ladle. The influence of impeller structure, rotation speed, gas flow rate, eccentricity on the mixing effect of molten steel in ladle was investigated from the aspects of flow field and gas volume distribution. The results showed that, under the conditions of using the SSB-D impeller, the rotation speed of 200 r/min, the gas flow rate of 1.5 m³/h and the eccentricity of 0.4, the flow field distribution in the molten iron is more uniform while the magnesium vapor bubbles are more dispersed and refined in the molten iron. The gas-liquid contact area of magnesium vapor and hot metal is increased to improve the desulfurization efficiency of magnesium vapor.

Key words: bottom blown; mechanical stirring; bubble micro refinement; desulfurization; numerical simulation

随着市场对钢种质量越来越高的要求, 国内外钢铁企业开始采用铁水预处理来严格控制硫含量^[1]. 目前应用最广泛的脱硫工艺是 KR 法和喷吹法^[2]. KR 法是通过搅拌桨在熔池中搅拌产生漩涡, 然后往熔池中喷入脱硫剂, 脱硫剂被漩涡卷入熔池, 在高温下乳化与铁水反应, 从而进行脱硫^[3]. 文献显示^[4], 采用氧化钙粉末做脱硫剂, 脱硫效率很低, 渣含铁量也会增大, 从而造成铁的损失. 喷吹法是用载气携带粉末状的脱硫剂经过喷枪吹入铁水中. 载气的喷入起到了搅拌铁水的作用, 可以使铁水、载气和脱硫剂混合均匀, 从而达到脱硫的目的. 该方法的优点是设备简单, 但镁蒸气利用率低, 脱硫效率低.

针对 KR 法和喷吹法的缺点, 张延安等提出了“机械搅拌原位脱硫”的新工艺^[5]. 具体过程为: 镁基脱硫剂被放置于搅拌桨下方的料盒, 通过载气将脱硫剂喷入熔池. 在高温条件下, 脱硫剂在熔池内原位产生镁蒸气气泡, 同时利用搅拌桨的

搅拌对镁蒸气气泡进行破碎和分散,在气泡上浮过程中对铁水进行脱硫。

刘燕等^[6-9]采用物理模拟的方法,研究了不同搅拌方式和搅拌桨桨叶结构对气液传质速率和气泡分布范围的影响规律,采用因次分析的方法得到了气泡尺寸与操作条件的经验公式. 本文在其研究的基础上,采用数值模拟方法对底吹 - 机械搅拌耦合体系内的熔池流场和气体分布特点进行了深入研究。

1 模型建立

为了简化模型和提高计算效率,本文计算时仅考虑液面以下气液两相区域,而忽略了熔池上部的空气层区域. 图 1 为数学模型网格划分示意图。

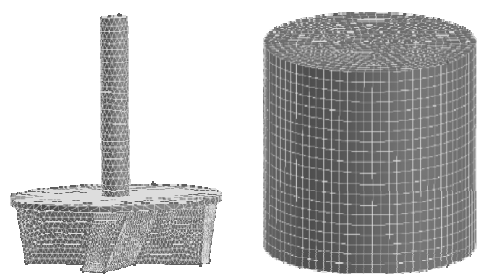


图 1 数学模型的网格划分
Fig. 1 Mesh division of mathematical model

采用 Gambit 软件把几何模型划分为两部分区域,搅拌桨转动区域部分用四面体非结构网格来划分,网格数目为 3.13 万个. 剩余的部分采用六面体结构网格划分,网格数目为 21.5 万个。

透气砖上表面设置为速度入口边界条件;模型的顶面被设置为自由液面;对由于搅拌桨转动导致熔池中的动量传输现象,使用多重参考系法来进行处理。

本文的计算过程均采用 Fluent 15.0 进行,采用 SIMPLE 算法对压力 - 速度耦合进行求解. 时间步长取 0.01 s,共计算 3 000 个时间步长。

2 结果与讨论

2.1 搅拌桨对熔池流场和气体分布的影响

本文在数值模拟过程中,使用了三种不同结构的搅拌桨,如图 2 所示。

图 3 是搅拌转速 200 r/min,通气流量 1.5 m³/h,偏心度 0.4 时,不同搅拌桨类型下,熔池内部气体分布的模拟结果。

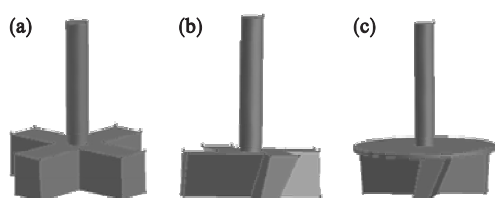


图 2 三种不同结构的桨叶结构
Fig. 2 Three different impeller structures
(a)—VB; (b)—SSB; (c)—SSB - D.

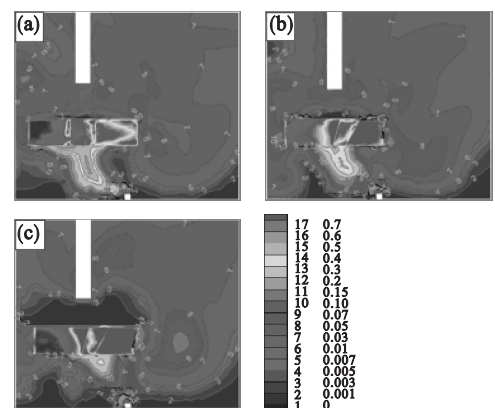


图 3 不同搅拌桨结构下熔池中的气体分布
Fig. 3 Gas volume fraction in the bath with different impeller structures
(a)—VB; (b)—SSB; (c)—SSB - D.

如图 3 所示,因为气泡在熔池中快速上浮,所以当使用 VB 和 SSB 桨时,气泡基本上都集中在搅拌桨上方,而在熔池底部,有些位置基本不存在气泡或者气泡很少,称为“死区”. 当采用 SSB - D 桨时,因为桨叶上方的圆盘可以起到阻止气泡快速上浮的作用,所以在圆盘上方会有部分“死区”. 熔池上方,“死区”面积明显减少,同时在搅拌桨快速转动下,更加有利于气泡在熔池内均匀分散,提高脱硫效率。

图 4 是在与图 3 相同条件下,不同搅拌桨结构下熔池内部的流场图. 由图 4 可知,使用 VB 和 SSB 桨时,流场没有太大变化,桨周围由于搅拌作用,产生了多个小环流,搅拌桨周围的液体速度较快,上部的液体流速较慢。

而当采用 SSB - D 桨时,在桨周围形成更多的环流,且在熔池上半部分,环流增加,可以使熔池的混匀效果更好. 流体向下流动的趋势与上升的气泡群形成对流,可以降低气泡的上浮速度,增加熔池内气泡的停留时间。

2.2 搅拌转速对熔池流场和气体分布的影响

图 5 和图 6 是采用 SSB - D 桨时,搅拌转速对熔池中的气体分布范围和熔池内部流场的影响,此时搅拌桨的偏心度为 0.4,通气流量为 2.0 m³/h。

如图 5a ~ 5d 所示,气体分布范围随着搅拌转速的增加而增加. 当搅拌转速为 200 r/min 时,气泡基本覆盖了整个熔池,下部的“死区”面积已经很小了. 搅拌转速继续增大到 250 r/min 后,气

体分布范围变化不是很明显. 说明在一定范围内增大搅拌转速可以增强熔池中的气泡分散范围,继续增大搅拌转速,并不能达到预期的效果,反而会增加能量消耗.

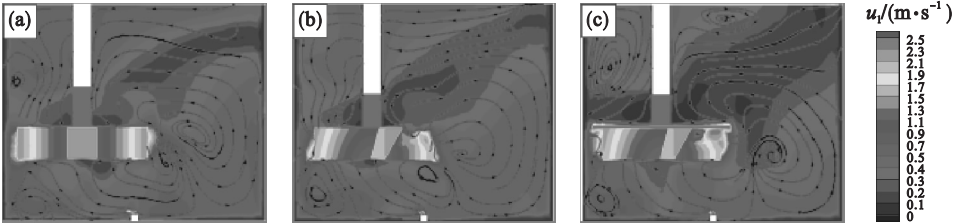


图 4 不同搅拌桨结构下熔池中的流场
Fig. 4 Flow filed in the bath with different impeller structures
(a)—VB; (b)—SSB; (c)—SSB - D.

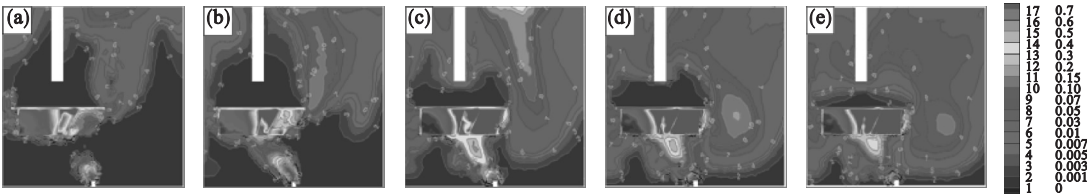


图 5 不同搅拌转速下熔池中的气体分布
Fig. 5 Gas volume fraction in the bath with different rotation speeds
(a)—50 r/min; (b)—100 r/min; (c)—150 r/min; (d)—200 r/min; (e)—250 r/min.

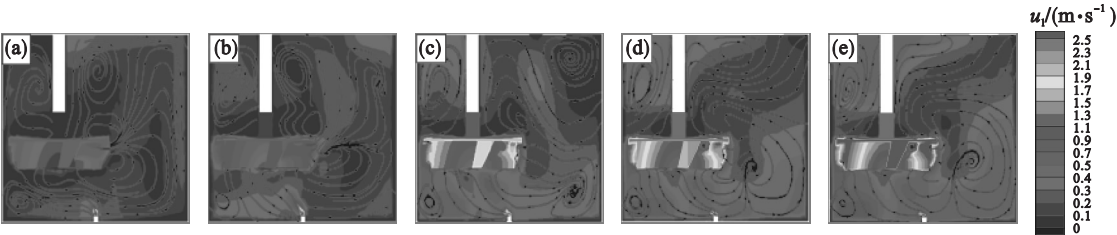


图 6 不同搅拌转速下熔池中的流场
Fig. 6 Flow filed in the bath with different rotation speed of impeller
(a)—50 r/min; (b)—100 r/min; (c)—150 r/min; (d)—200 r/min; (e)—250 r/min.

2.3 通气流量对熔池流场和气体分布的影响

图 7 和图 8 是采用 SSB - D 桨时,通气流量对熔池中的气体分布范围和熔池内部流场的影

响,此时搅拌桨的偏心度为 0.4,搅拌转速为 200 r/min.

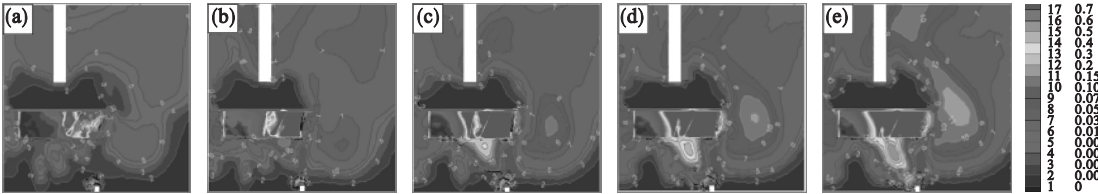


图 7 不同通气流量下熔池中的气体分布
Fig. 7 Gas volume fraction in the bath with different gas flow rates
(a)—0.5 m³/h; (b)—1.0 m³/h; (c)—1.5 m³/h; (d)—2.0 m³/h; (e)—2.5 m³/h.

如图 7 所示,熔池中的气体分布区域随通气流量的增加变化不明显,但气体的密集度却随通气流量的增加而增加. SSB - D 桨所带的圆盘对气泡的上浮过程起到了阻挡和改变上浮路径的作

用,因而造成搅拌桨上部出现气泡稀少区. 底吹气体的向上浮力对熔池起到了一定的搅拌作用,随着气体流量的增大,液体流速值有所降低,这主要是因为熔池内气泡上浮消耗了部分液体动能. 如

图 8 所示,熔池内的循环流数量随着气体流量的增加而增加,在流量达到 $1.5\text{ m}^3/\text{h}$ 时,熔池内产生了 4 个明显的循环流,这些循环流可以增加熔池内部的混匀程度,增加了气泡在熔池中的分散

范围,提高了脱硫效率.继续增大气体流量,循环流的数量并没有增加,反而会因为镁蒸气不能完全反应,大量溢出造成镁蒸气利用率降低.

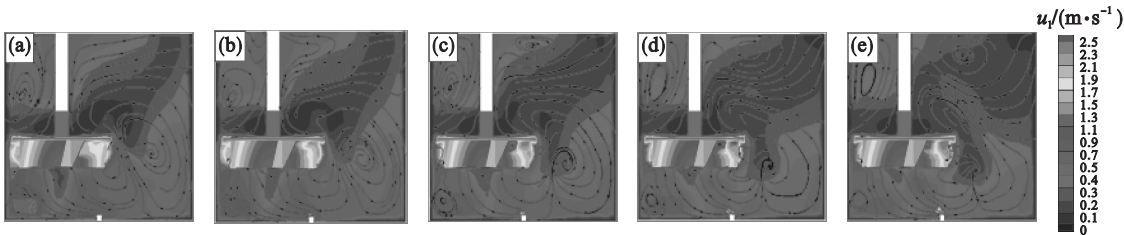


图 8 不同通气流量下熔池中的流场
Fig. 8 Flow field in the bath with different gas flow rates
(a)— $0.5\text{ m}^3/\text{h}$; (b)— $1.0\text{ m}^3/\text{h}$; (c)— $1.5\text{ m}^3/\text{h}$; (d)— $2.0\text{ m}^3/\text{h}$; (e)— $2.5\text{ m}^3/\text{h}$.

2.4 搅拌桨位置对熔池流场和气体分布的影响
图 9 是在搅拌转速为 $200\text{ r}/\text{min}$,通气流量为

$1.5\text{ m}^3/\text{h}$ 时,在搅拌桨不同偏心度下,熔池内部气泡分布的模拟预测结果.

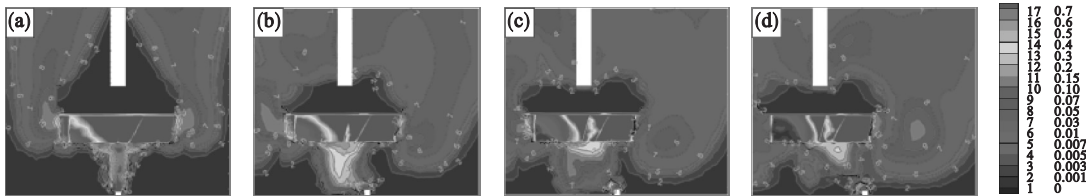


图 9 不同搅拌桨偏心度下熔池中的气体分布
Fig. 9 Gas volume fraction in the bath with different eccentricity of impeller
(a)— $e = 0$; (b)— $e = 0.2$; (c)— $e = 0.3$; (d)— $e = 0.4$.

由图 9 可知,当搅拌桨位于熔池中心时,气泡主要分布在搅拌桨桨叶附近.在熔池底部除透气砖区域外,几乎不存在气体的分布.随着搅拌桨偏心度的增大,气体在熔池中的分布范围越来越大,在熔池的两侧开始出现大量的气体.当搅拌桨的

偏心度 $e = 0.4$ 时,熔池底部分布的气体越来越多,气体在熔池中分布也越广泛,密集程度也随着增加.

图 10 是在相同实验条件下,搅拌桨不同偏心度对熔池内流场分布的影响.

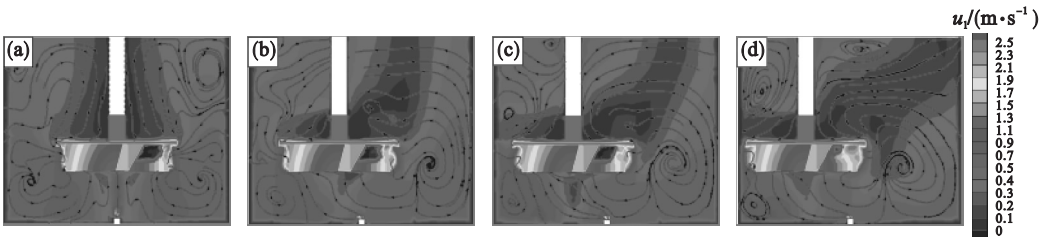


图 10 不同搅拌桨偏心度下熔池中的流场
Fig. 10 Flow field in the bath with different eccentricity of impeller
(a)— $e = 0$; (b)— $e = 0.2$; (c)— $e = 0.3$; (d)— $e = 0.4$.

由图 10 可知,当搅拌桨的偏心度等于零,即搅拌桨在熔池中心时,熔池内部流场在搅拌桨两侧出现多个左右对称的小漩涡.当搅拌桨的偏心度增加时,熔池中的流场对称环流被破坏,在整个熔池中产生了大环流,有利于熔池中温度和组分的均匀混合.

3 结 论

- 1) 采用 SSB - D 桨可以阻止气泡快速上浮,增加气泡在熔池内的停留时间.
- 2) 增大搅拌桨转速有利于增强气泡在熔池内的分散,转速为 $200\text{ r}/\text{min}$ 时,气泡细化和分散

效果最好.

3) 喷气流量的增加,会影响熔池内的循环流数量,可以增加溶池内部的混匀程度,有利于气泡在熔池中的分散.

4) 搅拌桨位置偏心时,在整个熔池中产生了大环流,有利于熔池中温度和组分的均匀混合.

参考文献:

[1] 冯聚合,艾立群,刘建华. 铁水预处理与钢水炉外精炼 [M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
(Feng Ju-he, Ai Li-qun, Liu Jian-hua. Molten iron pretreatment and molten steel refining [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2006.)

[2] Liu B Y. Applied effects of different hot metal desulfurizing processes[J]. *Iron and Steel*,2004,39(6):24 – 27.

[3] Liu Y,Zhang T A,Sano M,et al. Study on absorption rate by eccentric mechanical stirring in gas injection refining for iron and steel making[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2011,18 (sup2):166 – 171.

[4] 欧阳德刚,王庆方,刘守堂. KR 脱硫搅拌器的技术现状与发展方向[J]. 武钢技术,2005,43(5):55 – 57.)
(Ouyang De-gang, Wang Qing-fang, Liu Shou-tang. Technical status and development trend of KR desulfurization

agitator[J]. *Wuhan Iron and Steel Corporation Technology*, 2005,43(5):55 – 57.)

[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;ZL20081001186303. 3[P]. 2008 – 10 – 03.
(Zhang Ting-an,Liu Yan,He Ji-cheng,et al. External furnace desulfurization method and device with in-situ mechanical stirring;ZL20081001186303. 3[P]. 2008 – 10 – 03.)

[6] Liu Y,Sano M,Zhang T A,et al. Mechanical stirring for gas injection refining in iron and steel making;1. intensification of bubble disintegration[C]// ISIJ Meeting. Gifu;The Iron and Steel Institute of Japan,2007:786.

[7] Liu Y,Sano M,Zhang T A,et al. Mechanical stirring for gas injection refining in iron and steel making: 3. eccentric mechanical stirring for bubble disintegration [C] // ISIJ Meeting. Tokyo: The Iron and Steel Institute of Japan, 2008:82.

[8] Liu Y,Sano M,Zhang T A,et al. Mechanical stirring for gas injection refining in iron and steel making:4. perforated blade impeller for bubble disintegration and dispersion[C]// ISIJ Meeting. Tokyo: The Iron and Steel Institute of Japan, 2008:83.

[9] Liu Y,Sano M,Zhang T A,et al. Intensification of bubble disintegration and dispersion by mechanical stirring in gas injection refining [J]. *ISIJ International*, 2009, 49 (1): 17 – 23.