

100 t 铁水罐下 KR 搅拌法脱硫流场的数值模拟

张天旭¹ 宋劲松¹ 苏浩男¹ 周东东²

(1 承德石油高等专科学校 工业技术中心, 承德 067000; 2 北京科技大学 钢铁共性技术协同创新中心 北京 100083)

摘要 基于 Fluent 软件对直径 2.8 m、搅拌桨高 0.75 m、铁水高度 3.1 m 的 100 t 铁水罐 KR 脱硫进行数值模拟,得到铁水罐内铁水的流动状态及速度分布。通过对搅拌桨直径 0.7~1.1 m,浸入深度 1.00~1.34 m 和搅拌转速 60~140 r/min 下的流场和湍动能进行对比分析,得出最佳的工况为:搅拌转速 120 r/min、浸入深度 1.34 m、搅拌桨直径 0.9 m。通过工艺实践,铁水脱硫率达到 96% 以上。

关键词 100 t 铁水罐 KR 搅拌法 铁水脱硫预处理 流场 湍动能

Numerical Simulation of Desulfurization Flow Fields in KR Stirring of 100 t Iron Ladle

Zhang Tianxu¹, Song Jinsong¹, Su Haonan¹ and Zhou Dongdong²

(1 Chengde Petroleum College Industrial Technology Centre, Chengde 067000;

2 Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract Based on the software Fluent, the flow state and velocity distribution of hot metal in the 100 t iron ladle KR desulfurization with impeller diameter 2.8 m and height 0.75 m, and iron height 3.1 m are numeric-simulated. Through the comparative analysis on the flow field and turbulent kinetic energy with impeller diameter 0.7~1.1 m, immersion depth 1.00~1.34 m, and stirring speed 60~140 r/min, the best process parameters are 120 r/min of stirring speed, 1.34 m of immersion depth and 0.9 m of impeller diameter. Through the process practice, the desulfurization rate of hot metal can reach up to more than 96%.

Material Index 100 t Iron Ladle, KR Stirring Method, Hot Metal Desulfurization Pretreatment, Flow Fields, Turbulent Kinetic Energy

铁水预脱硫是决定钢液最终硫含量的主要工艺环节。对铁水进行脱硫预处理可以减轻高炉和转炉冶炼脱硫的负担,给企业带来较高的经济效益^[1]。目前,铁水预脱硫主要有 KR 搅拌法和 Mg 喷吹法两种工艺方法。KR 搅拌法最大的优势是能够为脱硫提供良好的动力学条件。在实际铁水预脱硫过程中,不能直接观察到铁水罐内铁水的流动状况。以前主要采用水模型实验对 KR 搅拌法形成的流场进行研究。许多冶金工作者应用水模型实验进行了大量的实验研究^[2-4],考察不同工艺参数对流场的影响,并取得了一定的成果。近些年,数值模拟在研究流场方面起着重要的作用,应用数值模拟可以比水模型实验更加方便和经济。尤其是在预测不同操作条件和不同尺寸参数下 KR 搅拌脱硫的流场中,采用数值模拟更加方便有效。许多研究者已经验证了数值模拟预测流场的正确性^[4-5]。本文主要利用 Fluent 软件对 100 t 铁水罐 KR 脱硫进行数值模拟,考察搅拌转速、浸入深度和搅拌桨直径等工艺参数对流场的影响,以期得到铁水罐内铁水的流动状态和最佳工艺技术参数,为工业生产提供参考依据。

1 数值模拟

1.1 尺寸参数及模拟工况

以 100 t 铁水罐 KR 脱硫为模型进行数值模拟,铁水罐及搅拌桨相关技术参数如表 1 所示。

表 1 铁水罐及搅拌器技术参数

Table 1 Technical parameters of iron ladle and agitator

容积(V)/t	铁水罐直径(D)/m	搅拌桨直径(d)/m	搅拌桨高(b)/m	铁水高度(Z)/m
100	2.8	0.7~1.1	0.75	3.1

表 2 模拟工况表

Table 2 Schedule of simulated working conditions

序号	浸入深度(c)/m	搅拌桨直径(d)/m	搅拌转速(n)/(r·min ⁻¹)
1			60
2			80
3	1.34	0.9	100
4			120
5			140
6	1.00	0.9	
7	1.80	0.9	
8		0.7	120
9	1.34	1.1	

以搅拌转速、浸入深度和搅拌桨直径作为单一变量进行数值模拟,考察不同工艺参数对流场的影响。具体模拟工况参数见表 2。其中,浸入深度为搅拌叶片中心到液面的距离。

1.2 守恒方程的建立

模拟过程用到的方程如下所示^[6]:

(1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

(1)

(2) 动量守恒方程(N-S 方程):

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu_i \cdot \mu_j) = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \mu_i}{\partial x_i \partial x_i} \quad (2)$$

(3) 湍动能 k 方程:

$$\frac{\partial \mu_i k}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\sigma_k}{\sigma_k} \right] = P_r - \varepsilon \quad (3)$$

$$P_r = \nu_t \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

(4) 湍动能耗散方程:

$$\frac{\partial \mu_i \varepsilon}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] = \frac{C_{\varepsilon 1} \cdot \varepsilon \cdot P_r - C_{\varepsilon 2} \cdot \varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中: ∂ 、 v 、 ω - x 、 y 、 z 方向的速度分量; F_i -沿 i 方向的质量力; p -压力; ρ -流体密度; ν -流体的粘性系数; ν_t -涡粘性系数; P_r -湍动能生成率;常数: $C_\mu = 0.09$; $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\varepsilon = 1.3$; $C_{\varepsilon 1} = 1.51$; $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ 。

1.3 网格及边界条件

物理模型采用四面体网格进行划分,搅拌桨附近区域的网格应该进行加密。选择稳态求解器求解单相流的流动。采用多重参考系法^[7]对搅拌桨和铁水之间动量的耦合。整个物理模型分为内、外两个区域,定义区域重合边界为交界面,允许内、外两个区域之间的动量和能量的传输。

2 结果与讨论

图 1 显示的是当搅拌转速为 120 r/min、浸入深度为 1.34 m 和搅拌桨直径为 0.9 m 时铁水罐内相关面的速度矢量图。通过图 1 可知,铁水罐内铁水存

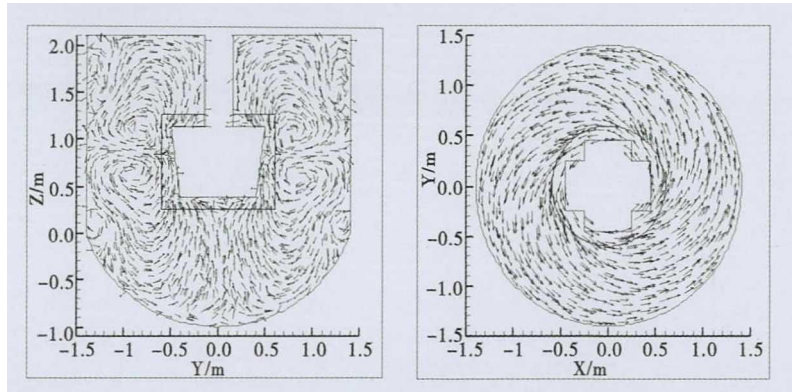


图 1 铁水罐面的速度矢量图 ($n = 120$ r/min, $c = 1.34$ m, $d = 0.9$ m)

Fig.1 Velocity vector diagram of molten iron pot ($n = 120$ r/min, $c = 1.34$ m, $d = 0.9$ m)

在轴向和切向两种环流。随着搅拌桨转动,搅拌桨周围的铁水沿径向朝铁水罐侧壁流动,流体碰到侧壁后分成两部分,分别向上和向下继续运动。在压力和重力的作用下,向上和向下运动的铁水又流向搅拌桨处,返回的铁水由于搅拌桨转动又沿径向流出,形成轴向的四个环流。在水平方向上,铁水随搅拌桨转动形成绕搅拌桨的切向环流。

2.1 搅拌转速对流场的影响分析

图 2 所示为浸入深度 1.34 m 和搅拌桨直径 0.9 m 时,不同搅拌转速下 $x = 0$ 垂直面的速度矢量图。由图 2 可知,搅拌桨两侧铁水的速度值最大。铁水罐底部铁水速度相对较小,即流动死区。随着搅拌转速的增大,所形成的轴向环流及环流上铁水速度值都明显增大,同时铁水罐底部流动死区的面积也越来越小。当搅拌转速为 140 r/min 时,流场相对于搅拌转速为 120 r/min 时并无较大改善,但桨叶附近铁水速度值却超过 7 m/s,加快对搅拌桨耐火材料的侵蚀。通过文献[8]中搅拌功的计算公式可知,搅拌功的大小与搅拌转速的三次方成正比。过大的搅拌转速所需要的功率消耗也越大。所以最佳的搅拌转速为 120 r/min。

湍动能分布是决定混合效率的一个关键性因素。图 3 显示为铁水罐内垂直线(0, 0.7, -1 ~ 2.1)上的湍动能分布曲线。通过分析湍动能曲线可知,湍动能值在与桨叶同等高度处于峰值。靠近铁水罐上部垂直线的湍动能值较均衡。垂直线上的湍动能随搅拌转速的增大而增大。

2.2 浸入深度对流场的影响分析

图 4 显示的是当搅拌转速为 120 r/min 和搅拌桨直径为 0.9 m 时,不同浸入深度下铁水罐内 $x = 0$ 垂直面的速度矢量图。浸入深度对铁水速度分布有

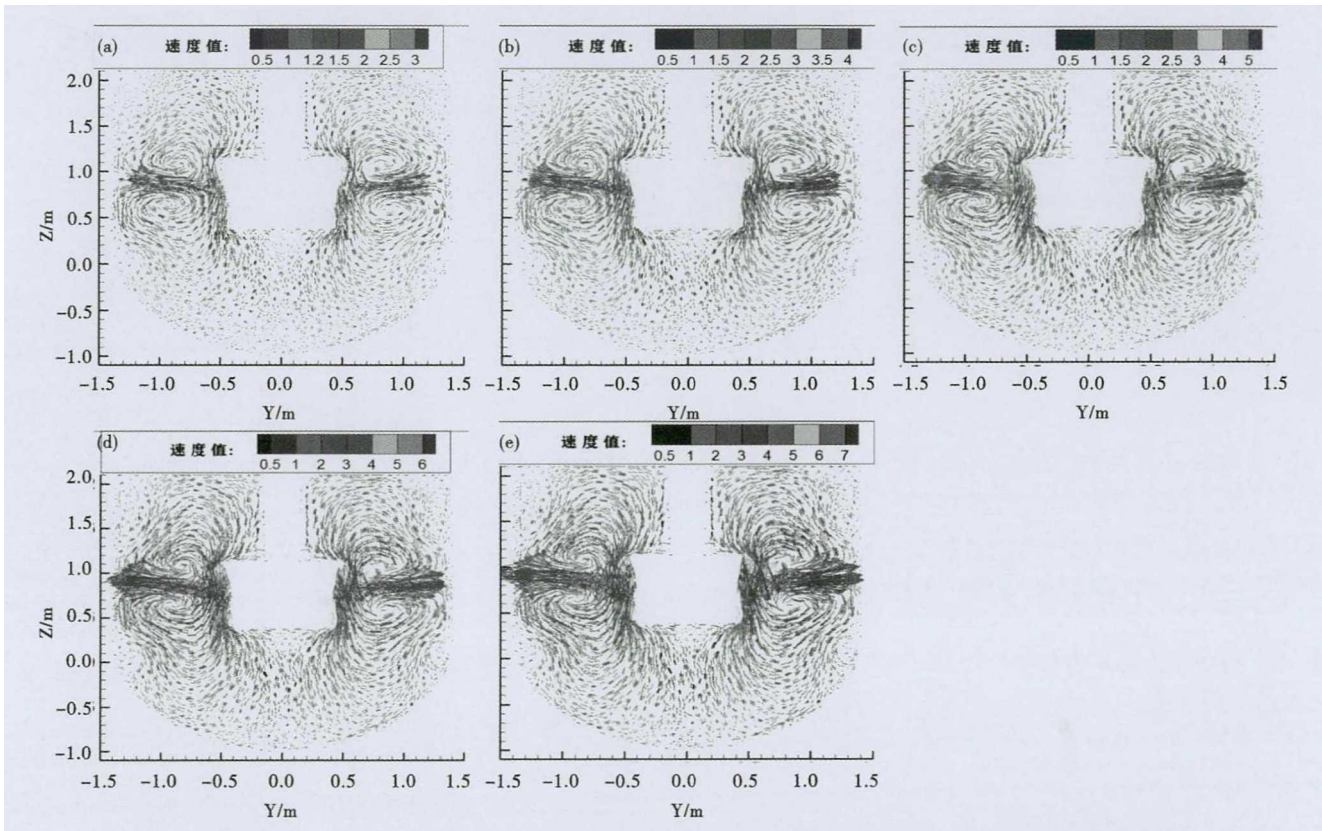


图2 搅拌转速/($r \cdot \min^{-1}$):60 (a),80 (b),100(c),120(d)和140 (e)时 $x=0$ 垂直面的速度矢量图

Fig.2 Velocity vector diagram of vertical plane of $x=0$ with stirring speed/($r \cdot \min^{-1}$):60 (a),80 (b),100 (c),120 (d) and 140 (e)

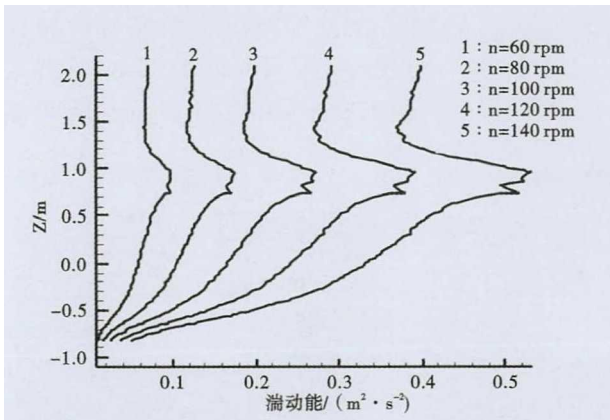


图3 垂直线(0,0.7, -1~2.1)上的湍动能分布曲线

Fig.3 Distribution curve of turbulent kinetic energy on the vertical line (0,0.7, -1 ~ 2.1)

很重要的影响。随着浸入深度的不断增大,垂直面上速度最大的区域位置和轴向环流的位置都相应地下降。当浸入深度为1.0 m时,轴向环流对铁水罐底部铁水的影响较小,流动死区相对较大。铁水罐顶部铁水的速度相对较大。当浸入深度为1.8 m时,流场分布与浸入深度为1.0 m时相反。过大或过小的浸入深度都会造成速度上下分布不均。

图5(a)显示的是铁水罐底部水平线上湍动能分布曲线。当浸入深度为1.0 m时,由于所取水平

线靠近桨叶的下边缘,垂直线上湍动能的最小值在 $x=0$ 处取得,而湍动能的最大值在与桨叶尖端同等水平位置取得,这是因为在桨叶下边缘存在一个速度很小的区域,此区域湍动能较小。当浸入深度为1.34 m和1.8 m时,垂直线上的湍动能在 $x=0$ 处取得最大值并沿着径向不断减小。图5(b)显示的为铁水罐顶部水平线的湍动能分布曲线。不同浸入深度下,此水平线的湍动能分布曲线形状基本一致,湍动能的最大值在与桨叶尖端同等水平位置取得,而湍动能的最小值在铁水罐侧壁和搅拌轴壁面处取得。

2.3 搅拌桨直径对流场的影响分析

图6显示的是当搅拌转速为120 r/min和浸入深度为1.34 m时,不同搅拌桨直径下垂直面的速度等值线图。不同搅拌桨直径下,速度分布形态基本相同,但数值大小不同。随着搅拌桨直径的增大,垂直面上整体的速度值都增大,搅拌条件更加充分。通过文献[8]中搅拌功的计算公式可知,搅拌桨直径越大,功率消耗也越大。因此,搅拌桨直径的选择必须在适当的范围。

图7显示的是不同搅拌桨直径下水平线的湍动能分布曲线。搅拌桨直径对湍动能有很大的影响作

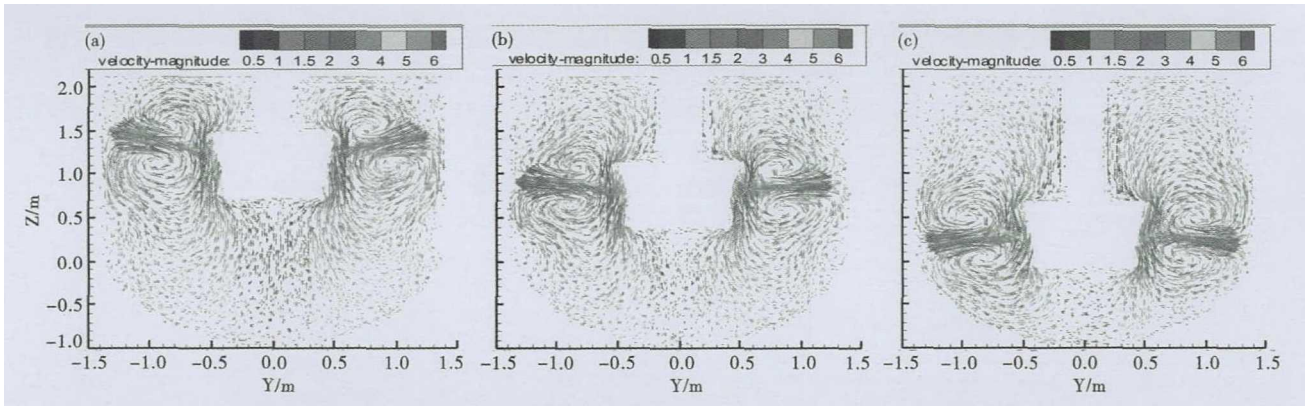


图 4 浸入深度 1.0 m (a), 1.34 m (b) 和 1.8 m (c) 时 $x=0$ 垂直面的速度矢量图

Fig. 4 Velocity vector diagram of vertical plane $x=0$ with immersion depth 1.0 m (a), 1.34 m (b) and 1.8 m (c)

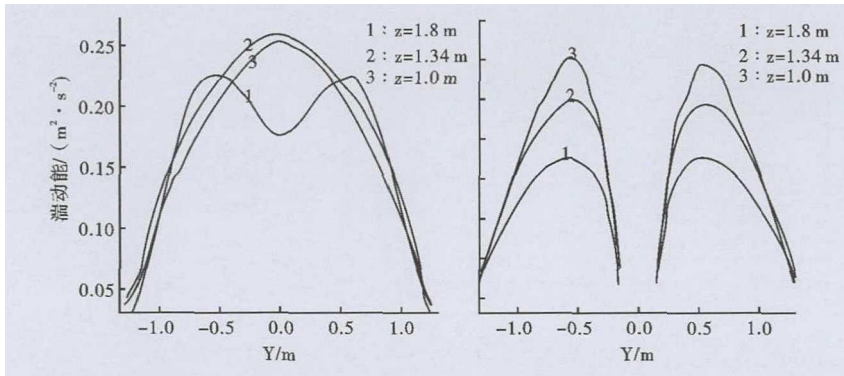


图 5 浸入深度(a) $(0, -1.4 \sim 1.4, -0.3)$ m 和(b) $(0, -1.4 \sim 1.4, 1.7)$ m 下水水平线上的湍动能分布曲线

Fig. 5 Distribution curves of turbulent kinetic energy on horizontal line with immersion depths $(0, -1.4 \sim 1.4, -0.3)$ m (a) and $(0, -1.4 \sim 1.4, 1.7)$ m (b)

用。所取水平线位于铁水罐的底部,湍动能的最大值在 $x=0$ 处取得,然后沿着径向不断减小直到在铁水罐侧壁取得最小值。当搅拌桨直径为 0.7 m 时,湍动能的最大值仅为 $0.13 \text{ m}^2/\text{s}^2$,但是当搅拌桨直径为 1.1 m 时,湍动能的最大值增大到 $0.53 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

3 应用结果

以钢厂 100 t 铁水罐 KR 法脱硫为例,在计算所得参数即搅拌转速 120 r/min、浸入深度 1.34 m、搅拌桨直径 0.9 m 下指导生产。从 2019 年

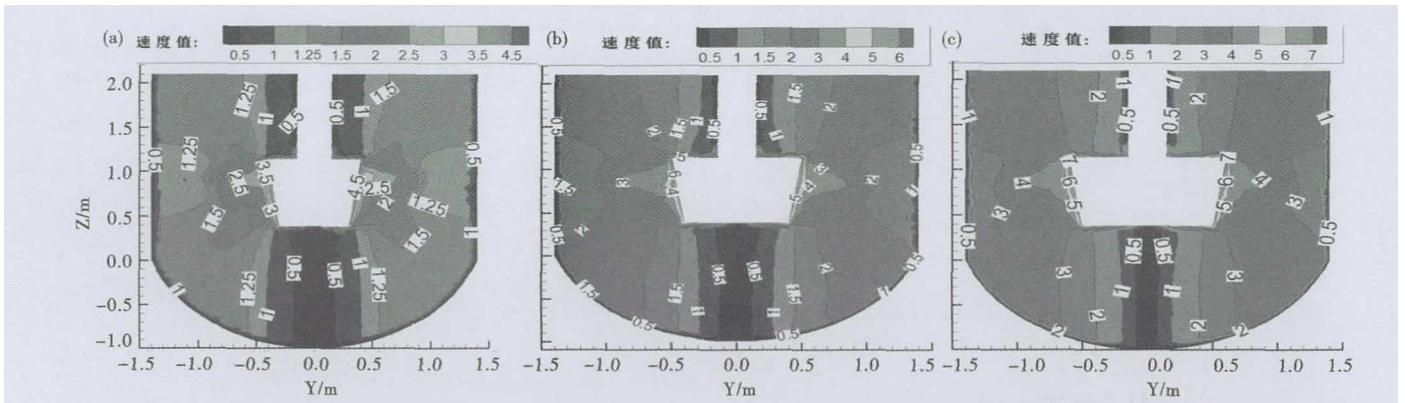


图 6 搅拌桨直径 0.7 m (a), 0.9 m (b) 和 1.1 m (c) 时垂直面 ($x=0$) 的速度等值线图

Fig. 6 Velocity isoline diagram of vertical plane $x=0$ with impeller diameter 0.7 m (a), 0.9 m (b) and 1.1 m (c)

10 月份生产数据中随机抽取 5 组数据,列于表 3。从表 3 可见:采用此工艺参数,铁水平均脱硫率达到 96% 以上。

4 结论

(1) 通过数值模拟得出了铁水罐内铁水的流动状态及速度分布,铁水罐内铁水形成四个轴向环流

和切向环流两种流动形式。搅拌桨两侧铁水的速度取得最大值,在铁水罐底部存在流动死区。

(2) 通过不同搅拌转速、浸入深度和搅拌桨直径等工况下的 KR 法脱硫铁水罐流场和湍动能的数值模拟分析,结合转速及搅拌桨直径对功率消耗的影响,得出本实验所用 100 t 铁水罐最佳的工艺参数

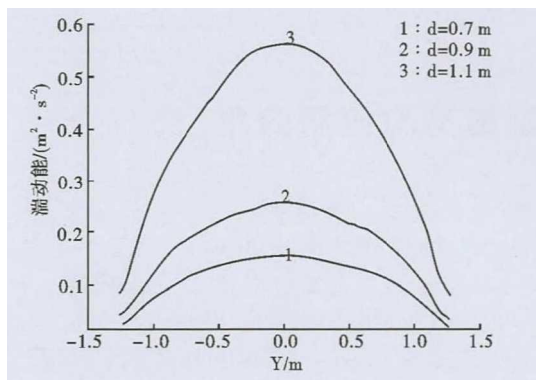


图7 不同搅拌桨直径时水平线(0, -1.4 ~ 1.4, -0.3)的湍动能分布曲线

Fig.7 Turbulent kinetic energy distribution curve of horizontal line(0, -1.4 ~ 1.4, -0.3) with different impeller diameters

表3 2019年10月份生产记录抽样数据

Table 3 Sampling data of production records for october 2019

序号	铁水中硫含量/%		脱硫剂消耗量 / (kg · t ⁻¹)	搅拌时间/min	脱硫率/%
	处理前	处理后			
1	0.019	0.001	5.212	7.0	94.7
2	0.021	0.001	5.315	8.0	95.2
3	0.023	0.001	4.409	8.0	95.6
4	0.032	0.001	5.513	8.0	96.9
5	0.031	0.001	5.457	8.0	96.8
平均值	0.025	0.001	5.181	7.8	96.0

为:搅拌转速 120 r/min、浸入深度 1.34 m、搅拌桨直径 0.9 m。

(3)在垂直方向上,湍动能在与桨叶同等高度时处于峰值。在水平方向上,在靠近桨叶下边缘的

小范围区域湍动能非常小。在铁水罐底部,湍动能的最大值在铁水罐水平中心取得。

基金项目:河北省高等学校科学技术研究项目资助(QN2019227)

参考文献

[1] 冯聚和. 铁水预处理与钢水炉外精炼[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.

[2] 田广亚. KR法铁水脱硫水模型实验研究[A]. 北京科技大学冶金与生态工程学院,冶金研究中心2005年“冶金工程科学论坛”论文集[C]. 北京科技大学冶金与生态工程学院,2005.

[3] 欧阳德刚,刘守堂,罗巍. KR脱硫搅拌器结构参数的水模优化实验[J]. 钢铁研究,2010,38(2):8-10.

[4] Shao Pin, Zhang Ting-an, Liu Yan. The numerical simulation on fluid flow in hot metal pretreatment[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18(Supplement 2):129-134.

[5] Wu W, Hu Y B. Physical Simulation of New Desulphurization Technology Using Pulsed and Rotary Stirring-Injection[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2008, 15(1):15-18.

[6] Isabelle N, Catherine X, Joel B. Direct Prediction of the Flows Induced by a Propeller in an Agitated Vessel Using an Unstructured Mesh. [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1998, 76:631-640.

[7] Deglon D A, Meyer C J. CFD Modelling of Stirred Tanks: Numerical Considerations [J]. Minerals Engineering, 2006, 19:1059-1068.

[8] 张戴杰. KR铁水脱硫搅拌功率和力矩的计算[J]. 钢铁, 1981, 16(12):12-19.

张天旭(1987-),男,硕士(2015年北京科技大学),讲师(2012年河北科技大学毕业),炼钢工艺研究。E-mail: yejintx@163.com

收稿日期:2019-12-05

欢迎订阅 2020 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 0714-6297888-8010