

铁水脱硫过程气泡平均直径的因次分析

王 坤, 刘 燕, 杨永坤, 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: 为了减小镁蒸气铁水脱硫过程中的气泡直径, 提高脱硫效率, 通过水模型实验研究了气泡平均直径与设备参数、操作条件之间的关系。通过高速照相机采集不同实验条件下的气泡分布状态图; 利用图像处理软件对所采集的图像进行处理, 得到气泡平均直径。对实验中气泡平均直径的主要影响因素进行分析, 由齐次原理和白金汉定律建立气泡平均直径与主要影响因素的关系式。根据实验数据求得拟合系数, 得出了气泡平均直径与实验条件之间的准数方程。

关 键 词: 脱硫; 铁水; 气泡平均直径; 因次分析; 图像处理

中图分类号: TQ 028

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2019)08-1105-05

Dimensional Analysis of Average Bubble Diameter in Desulfurization of Hot Metal

WANG Kun, LIU Yan, YANG Yong-kun, 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: liuyan@smm.neu.edu.cn)

Abstract: In order to decrease magnesium vapor bubble diameter in desulphurization of hot metal and to improve desulphurization efficiency, the effects of the equipment parameters and operating conditions on average bubble diameter were studied by a water model based experiment. The bubble dispersions under different experimental conditions were collected by a high-speed camera. The image analysis software was used to obtain the average bubble diameter under different experimental conditions and the major factors were analyzed by a water model based experiment. A relationship between the average bubble diameter and the major influencing factors was established, according to the homogeneous principle and Buckingham's theorem. The relationship between the average bubble diameter and the experimental conditions can be obtained by fitting the related parameters with experimental data.

Key words: desulfurization; hot metal; average bubble diameter; dimensional analysis; image processing

铁水预处理脱硫是降低钢中有害元素硫含量的主要途径, 目前最常用的脱硫方法为 KR 法和喷吹法^[1-2]。镁蒸气铁水脱硫是气液反应, 目前应用镁脱硫方法的脱硫效率都较低, 很重要的原因是铁水中产生的镁蒸气气泡较大^[3]; 因此, 提高脱硫效率的关键是将产生的镁蒸气大气泡破碎为小气泡, 使其均匀分散在铁水中, 通过增加气液接触面积来提高脱硫效率^[4]。针对这一问题, 结合 KR 法和喷吹法的优点, 张延安等提出了新型脱

硫技术——“机械搅拌原位脱硫”的新工艺^[5-6]; 该工艺利用载气携带镁基脱硫剂并将其喷吹进入铁水中, 在铁水中原位反应产生镁蒸气。经过搅拌桨搅拌, 镁蒸气的大气泡被破碎为小气泡, 并均匀广泛地分布在铁水中, 与铁水中的硫反应, 达到脱硫目的。刘燕等^[7-8]通过水模型实验, 研究了桨型、搅拌转速、搅拌桨浸入深度等因素对铁水脱硫气泡行为特性的影响, 得到了最佳工艺条件。

为了研究气泡直径与操作条件的准数方程,

收稿日期: 2018-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1760120); 国家重点研发计划子课题(2017YFC0210403-04)。

作者简介: 王 坤(1989-), 男, 河南项城人, 东北大学博士研究生; 刘 燕(1970-), 女, 湖南湘乡人, 东北大学教授, 博士生导师; 张延安(1960-), 男, 河南周口人, 东北大学教授, 博士生导师。

刘燕等^[8]研究了因次分析法在水模型实验中的应用.运用因次分析得到了氧气底吹炼铜过程中气泡直径与操作参数之间的准数方程^[9]和加压搅拌浸出体系下氧气的含气率与操作参数之间的准数方程^[10].本文通过水模型实验研究了铁水脱硫过程中气泡直径与各影响因素之间的关系,得到了相关准数方程.

1 实 验

本实验采用相似原理建立了某钢厂 120 t 铁水包的有机玻璃圆柱筒水模型实验设备.设备直径为 435 mm,高为 515 mm,液面高度为 350 mm.由于水与铁水的动力黏度相似,因此用水代替铁水,用空气代替铁水中的镁蒸气,以此模拟镁蒸气在铁水中的分布状态.实验过程中采用高速照相机(500 帧/s)采集熔池中的气泡分布瞬时状态,用图像处理软件 Image Pro-Plus 对采集的照片进行统计处理,从而得到气泡的平均直径.将得到的气泡平均直径代入准数方程,得到准数方程中的相关系数,最终确定气泡平均直径的准数方程.

表 1 变量因次表
Table 1 Variables in dimensional analysis

量纲	d_B	n	Q	h	e	v	D	ρ_g	μ_g	ρ_l	μ_l	H	σ_{g-l}	g	p
M	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1
L	1	0	3	1	0	1	1	-3	-1	-3	-1	1	0	1	-1
T	0	-1	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	-1	0	-2	-2	-2

注:M 代表质量量纲,L 代表长度量纲,T 代表时间量纲.

总变量数 $N=15$,独立变量数 $k=3$,由 π 定理可建立 $N-k=12$ 个无因次组合.选取 ρ_l,D,v 为独立变量.对于只含长度因次的变量 d_B,h 和 H ,在构造无因次 Π 时可以直接用独立变量 D 表示. e 为无因次量,可直接写出.经过计算,各个 Π 分别表示为

$$\Pi_0 = d_B/D, \tag{2}$$

$$\Pi_1 = \rho_l^{a_1} D^{b_1} v^{c_1} n, \tag{3}$$

$$\Pi_2 = \rho_l^{a_2} D^{b_2} v^{c_2} Q, \tag{4}$$

$$\Pi_3 = h/D, \tag{5}$$

$$\Pi_4 = e, \tag{6}$$

$$\Pi_5 = \rho_l^{a_5} D^{b_5} v^{c_5} \rho_g, \tag{7}$$

$$\Pi_6 = \rho_l^{a_6} D^{b_6} v^{c_6} \mu_g, \tag{8}$$

$$\Pi_7 = \rho_l^{a_7} D^{b_7} v^{c_7} \mu_l. \tag{9}$$

$$\Pi_8 = H/D, \tag{10}$$

$$\Pi_9 = \rho_l^{a_9} D^{b_9} v^{c_9} \sigma_{g-l}, \tag{11}$$

$$\Pi_{10} = \rho_l^{a_{10}} D^{b_{10}} v^{c_{10}} g, \tag{12}$$

研究气泡平均直径与设备参数、操作条件之间的关系,对指导放大实验过程、进行工业生产具有重要意义.

2 气泡平均直径准数方程的建立及系数确定

2.1 气泡平均直径准数方程的建立

由实验可知,影响气泡平均直径 d_B 的主要因素有搅拌转速 n 、通气流量 Q 、搅拌桨浸入深度 h 、偏心度 e 等.由文献[9]可知气泡平均直径 d_B 也与容器直径 D 、气体密度 ρ_g 、气体出口速度 v 、气体黏度 μ_g 、液体密度 ρ_l 、液体黏度 μ_l 、液面高度 H 、气液表面张力 σ_{g-l} 、重力加速度 g 、入射气体压强 p 等因素有关.由因次分析原理可以得出一般的函数形式为

$$d_B = f(n, Q, h, e, v, D, \rho_g, \mu_g, \rho_l, \mu_l, H, \sigma_{g-l}, g, p). \tag{1}$$

上述变量的因次如表 1 所示.

$$\Pi_{11} = \rho_l^{a_{11}} D^{b_{11}} v^{c_{11}} p. \tag{13}$$

对于 Π_1 ,代入相关变量的因次,可得关系式:
$$[M^0 L^0 T^0] = [ML^{-3}]^{a_1} [L]^{b_1} [LT^{-1}]^{c_1} [T^{-1}]. \tag{14}$$

由此可得方程组:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= 0, \\ -3a_1 + b_1 + c_1 &= 0, \\ -c_1 - 1 &= 0. \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

解得 $a_1=0, b_1=1, c_1=-1$.

故 $\Pi_1 = \frac{Dn}{v}$.同理,可得因次

$$\Pi_2 = \frac{Q}{vD^2}, \tag{16}$$

$$\Pi_5 = \frac{\rho_g}{\rho_l}, \tag{17}$$

$$\Pi_6 = \frac{\mu_g}{\rho_l D v} = \frac{1}{Re'}. \tag{18}$$

式中 Re' 为相对雷诺数.

$$\Pi_7 = \frac{\mu_1}{\rho_1 D v} = \frac{1}{Re}. \tag{19}$$

式中 Re 为雷诺数, 可用来表征流体流动情况的无量纲数.

$$\Pi_9 = \frac{\sigma_{g-1}}{\rho_1 D v^2} = \frac{1}{We}. \tag{20}$$

式中 We 为韦伯数, 代表惯性力和表面张力效应之比.

$$\Pi_{10} = \frac{p}{\rho_1 v^2} = Eu. \tag{21}$$

式中 Eu 为欧拉数, 描述动量传递的特征数, 体现了在流动过程中动量损失率的相对大小.

$$\Pi_{11} = \frac{gD}{v^2} = \frac{1}{Fr}. \tag{22}$$

式中 Fr 为弗劳德数, 表示重力对流动影响的准数.

将各因次代入式(1)可得

$$f_1\left(\frac{d_B}{D}, \frac{Dn}{v}, \frac{Q}{vD^2}, \frac{h}{D}, e, \frac{\rho_g}{\rho_1}, Re', \frac{H}{D}, We, Eu, Fr\right) = 0. \tag{23}$$

通过分析本文的研究内容, 可知主要影响气泡的是 We 数, 因此可以忽略 Re', Re, Eu 和 Fr . 式(23)可以简化为

$$\frac{d_B}{D} = f_2\left(\frac{Dn}{v}, \frac{Q}{vD^2}, \frac{h}{D}, e, \frac{\rho_g}{\rho_1}, \frac{H}{D}, We\right). \tag{24}$$

此外, 实验中 ρ_g, ρ_1 和 H/D 为定量, 于是又可得到

$$\frac{d_B}{D} = kf_3\left(\frac{Dn}{v}, \frac{Q}{vD^2}, \frac{h}{D}, e, We\right). \tag{25}$$

式(25)中 $f_3\left(\frac{Dn}{v}, \frac{Q}{vD^2}, \frac{h}{D}, e, We\right)$ 随 $\frac{Dn}{v}, \frac{Q}{vD^2}, \frac{h}{D}, e$ 和 We 的具体变化关系由实验来确定.

2.2 准数方程关系式的确定

根据因次分析的特点, 可认为不同搅拌桨桨型和喷嘴结构下因次公式的形式是相同的, 不同的是具体经验公式的结果. 各种现象的准则关系式在自变量介于某一范围内往往都可以采用幂函数的形式表述, 因次可以拟合出经验准则关系式:

$$\frac{d_B}{D} = A \left(\frac{Dn}{v}\right)^B \left(\frac{Q}{vD^2}\right)^C \left(\frac{h}{D}\right)^{D'} (e)^E (We)^F. \tag{26}$$

式中 A, B, C, D', E 和 F 为拟合系数.

将式(26)两边取对数得

$$\ln \frac{d_B}{D} = \ln A + B \ln \frac{Dn}{v} + C \ln \frac{Q}{vD^2} + D' \ln \frac{h}{D} + E \ln e + F \ln We. \tag{27}$$

依据上述线性关系对实验数据进行处理, 可

以得到拟合系数 A, B, C, D', E 和 F .

对于偏心搅拌, 因为 $We = \rho_1 D v^2 / \sigma_{g-1}$, 式中各变量都恒定, 因此 We 为定值, 所以式(27)中 $\ln A, F \ln We$ 为定值, 这些定值可以合并为一项 $G = \ln A + F \ln We, G$ 也是恒定的.

式(27)可以改写为

$$\ln \frac{d_B}{D} = G + B \ln \frac{Dn}{v} + C \ln \frac{Q}{vD^2} + D' \ln \frac{h}{D} + E \ln e. \tag{28}$$

为了求拟合系数 B , 在搅拌转速 n 变化的同时必须保证其他量不变, 因此式(28)可简化为

$$\ln \frac{d_B}{D} = H + B \ln \frac{Dn}{v}. \tag{29}$$

将镁蒸气脱硫的水模型实验数据线性拟合, 可以得到 $B = -0.07, H = -5.676$, 拟合曲线如图 1 所示.

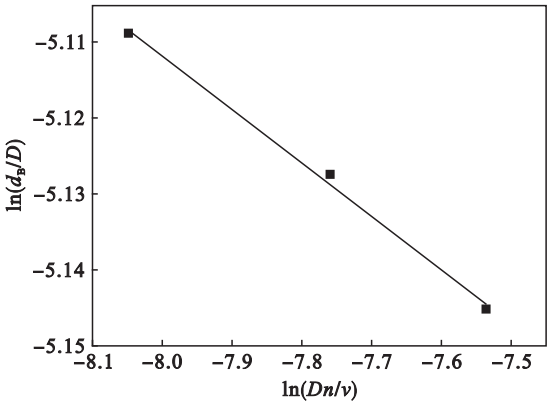


图 1 $\ln(d_B/D)$ 与 $\ln(Dn/v)$ 的拟合曲线
Fig. 1 Fitting curve between $\ln(d_B/D)$ and $\ln(Dn/v)$

同理, 由图 2 ~ 图 4 依次可以得到 $C = 0.045, D' = -0.243, E = -0.358, G = -5.481$, 则经验公式为

$$\frac{d_B}{D} = 0.00416 \left(\frac{Dn}{v}\right)^{-0.07} \left(\frac{Q}{vD^2}\right)^{0.045} \left(\frac{h}{D}\right)^{-0.243} e^{-0.358}. \tag{30}$$

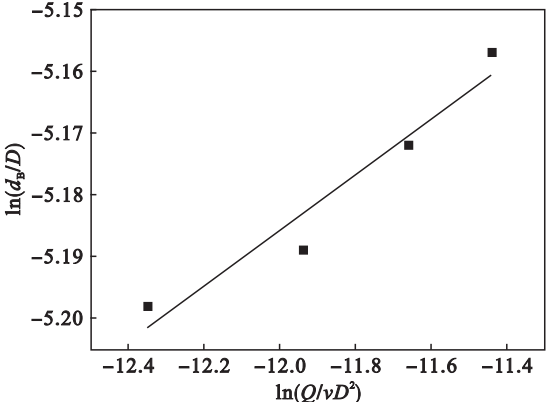


图 2 $\ln(d_B/D)$ 与 $\ln(Q/vD^2)$ 的拟合曲线
Fig. 2 Fitting curve between $\ln(d_B/D)$ and $\ln(Q/vD^2)$

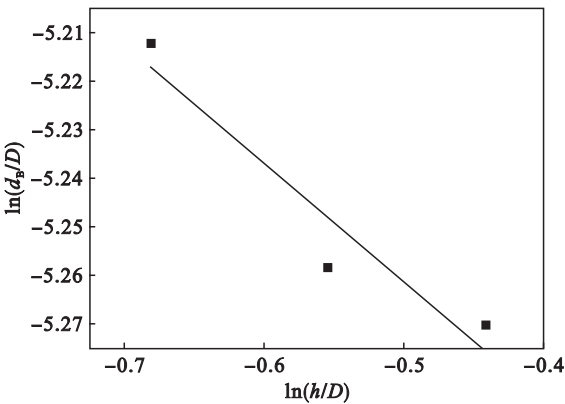


图 3 $\ln(d_B/D)$ 与 $\ln(h/D)$ 的拟合曲线
Fig. 3 Fitting curve between $\ln(d_B/D)$ and $\ln(h/D)$

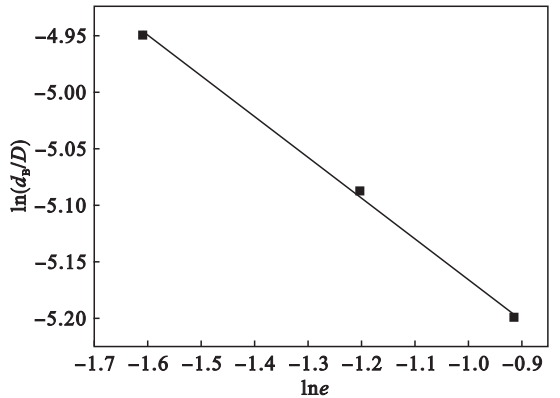


图 4 $\ln(d_B/D)$ 与 $\ln e$ 的拟合曲线
Fig. 4 Fitting curve between $\ln(d_B/D)$ and $\ln e$

3 分析与讨论

3.1 不同通气流量下搅拌转速对气泡平均直径的影响

取搅拌桨偏心度 $e = 0.4$, 搅拌桨浸入深度 $h = 250\text{ mm}$, 通气流量分别为 $1.0, 1.5, 2.0, 2.5\text{ m}^3/\text{h}$ 时, d_B 与搅拌转速 n 之间的关系可以表示为

$$d_B = 0.00379 \times n^{-0.07} Q^{0.045}. \quad (31)$$

将 Q 值代入式(31)得到不同通气流量下, 搅拌转速对气泡平均直径的影响结果如图 5 所示.

从图 5 中可以看出, 在通气流量相同时, 随着搅拌转速的增加, 气泡的平均直径减小. 这是因为在通气流量一定时, 增大搅拌转速, 单位时间内熔池的搅拌次数增多, 形成的剪应力也就越大, 对气泡的破坏也越强, 因此气泡的平均直径越小. 从图 5 还可以看出, 当搅拌转速一定时, 随着通气流量增加, 熔池内的气泡平均直径也增大.

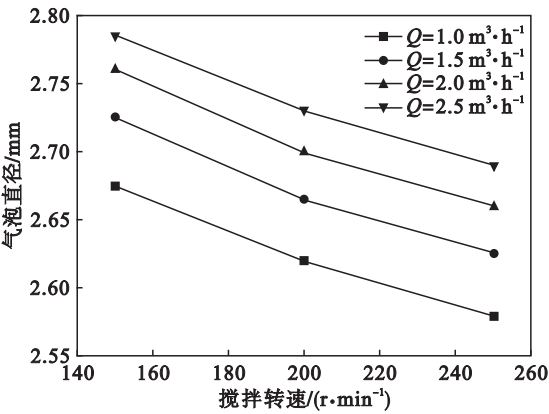


图 5 不同通气流量和搅拌转速下的气泡平均直径
Fig. 5 Effect of rotation speed on average bubble diameter under different gas flow rates

3.2 不同偏心度下搅拌转速对气泡平均直径的影响

取 $Q = 1.0\text{ m}^3/\text{h}$, 搅拌桨浸入深度 $h = 250\text{ mm}$, 搅拌桨偏心度分别为 $0.2, 0.3$ 和 0.4 时, d_B 与搅拌转速 n 之间的关系可以表示为

$$d_B = 0.00273 \times n^{-0.07} e^{-0.358}. \quad (32)$$

将 e 值代入式(32)得到不同偏心度下, 搅拌转速对气泡平均直径的影响如图 6 所示. 可以看出, 偏心度相同时, 随着搅拌转速的增加, 气泡平均直径减小. 在相同的搅拌转速下, 随着偏心度的增加, 气泡的平均直径逐渐减小. 因为当搅拌转速一定时, 随着搅拌桨偏心度增大, 搅拌桨产生的漩涡远离了桨轴, 形成的切向流很不稳定, 在熔池中形成了很强的紊流状态, 阻止了气泡的聚并, 同时又进一步促进了气泡的破碎.

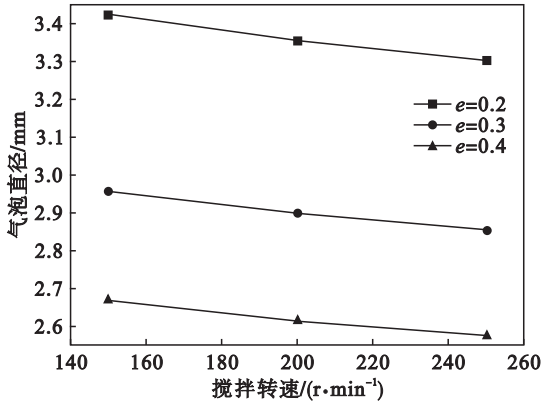


图 6 不同偏心度和搅拌转速下的气泡平均直径
Fig. 6 Effect of rotation speed on average bubble diameter under different impeller eccentricities

3.3 不同搅拌桨浸入深度下搅拌转速对气泡平均直径的影响

取 $Q = 1.0\text{ m}^3/\text{h}$, 偏心度 $e = 0.4$, 搅拌桨浸入

深度分别为 220,250 和 280 mm 时, d_B 与搅拌转速 n 之间的关系可以表示为

$$d_B=0.002\,71\times n^{-0.07}e^{-0.243}.\tag{33}$$

将 h 值代入式 (33) 得到不同搅拌桨浸入深度下,搅拌转速对气泡平均直径的影响如图 7 所示.

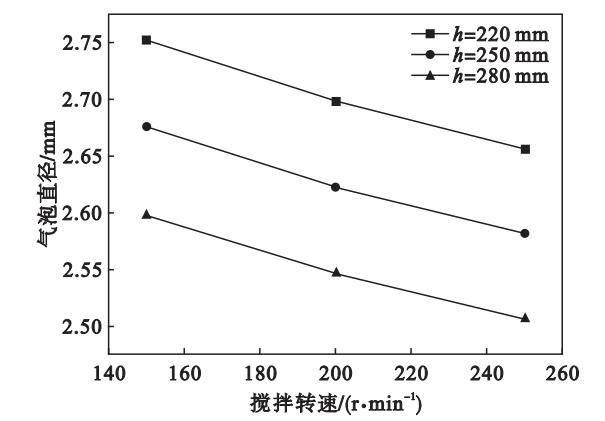


图 7 不同搅拌桨浸入深度和搅拌转速下的气泡平均直径
Fig. 7 Effect of rotation speed on average bubble diameter under different impeller immersion depths

从图 7 中可以看出,在搅拌桨浸入深度相同时,随着搅拌转速的增加,气泡平均直径减小.在相同的搅拌转速下,随着搅拌桨浸入深度的增加,气泡的平均直径也减小.这是通过因次分析,只计算了气泡的平均直径,忽略了随着搅拌桨浸入深度的增加,熔池内部分气泡聚合的情况.

4 结 论

1) 增大通气流量后,由于气泡之间的聚合作用,气泡的平均直径随之增大,降低了气泡的比表面积和气液反应的接触面积,不利于提高脱硫效率.

2) 增加搅拌转速、搅拌桨偏心度和搅拌桨浸入深度均有利于减小气泡平均直径,并有利于气泡在熔池中的均匀分布,从而提高脱硫效率.

3) 通过对水模型实验数据的拟合,得出气泡平均直径与操作参数之间的准数方程为

$$\frac{d_B}{D}=0.004\,16\left(\frac{Dn}{\nu}\right)^{-0.07}\left(\frac{Q}{\nu D^2}\right)^{0.045}\left(\frac{h}{D}\right)^{-0.243}e^{-0.358}.$$

参考文献:

[1] Liu Y,Zhang T A,Sano M,et al. Mechanical stirring for highly efficient gas injection refining [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21 (8): 1896 – 1904.

[2] 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.

[3] Liu Y,Zhang Z M,Liu J N,et al. Cold model study on Mg desulfurization of hot metal under mechanical stirring [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2013, 20 (12): 1 – 6.

[4] 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.

[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,Shao P,Zhao H L,et al. Simulation on gas injection refining process with mechanical stirring [J]. *Telkonnika Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2012, 10 (8): 2194 – 2201.

[7] Liu Y,Zhang Z M,Sano M,et al. Improvement of impeller blade structure for gas injection refining under mechanical stirring [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2014, 21 (2): 135 – 143.

[8] 刘燕,张延安,王强,等. 因次分析法在水模型实验中的应用 [J]. *工业炉*, 2007, 29 (6): 14 – 17. (Liu Yan,Zhang Ting-an,Wang Qiang,et al. Dimension analysis theory in the application of fluid mechanics [J]. *Industrial Furnace*, 2007, 29 (6): 14 – 17.)

[9] Wang D X,Liu Y,Zhang Z M,et al. Dimensional analysis of average diameter of bubbles for bottom blown oxygen copper furnace [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 2016: 1 – 8.

[10] 田磊,刘燕,吕国志,等. 加压搅拌浸出体系下氧气的气含率 [J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27 (3): 655 – 665. (Tian Lei,Liu Yan,Lyu Guo-zhi,et al. Gas holdup in pressure agitation leaching system [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27 (3): 655 – 665.)