

压力能驱动是自搅拌反应器流动特性数值模拟

张子木^{1,2}, 吕超², 赵秋月², 刘燕²

(1. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 提出了一种新型自搅拌管式反应器, 并采用数值模拟方法对新型自搅拌溶出反应器内的流体流动特性进行了研究. 在搅拌转速不变的情况下, 研究了不同入口流速对反应器内部流体流动的影响. 结果表明: 不同流速下, 反应器内部轴向流速整体分布均匀, 但反应器入口和出口的流体, 由于受到扰动作用速度偏大, 且靠近出口的流速低于入口附近流速. 径向靠近壁面处速度稍大, 靠近搅拌轴处速度略小, 说明搅拌桨叶端部对流体作用更大. 入口流速为 8.3 m/s 时, 更利于反应器内环流的形成.

关 键 词: 数值模拟; 自搅拌; 流动特性; 反应器; 压力能

中图分类号: TQ 027.3 + 5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)07-0962-04

Numerical Simulation on Flow Characteristics of Self-stirring Reactor Driven by Pressure Energy

ZHANG Zi-mu^{1,2}, LYU Chao², ZHAO Qiu-yue², LIU Yan²

(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHAO Qiu-yue, E-mail: zhaoqy@smm.neu.edu.cn)

Abstract: A new kind of self-stirring tubular reactor was presented and numerical simulation approach was adopted to investigate the flow characteristics in the novel self-stirring leaching reactor. With the same agitation speed, the influence of inlet flow rate on fluid flow in the reactor was studied. The results show that, in different inlet flow conditions, the flow velocity distribution was uniform in the axial direction, but the velocities of fluids in inlet and outlet regions were higher due to the disturbance action, and the velocity in the outlet region was lower than that in the inlet region. In the radial direction, the velocity near the wall was higher and that close to the agitating shaft was lower, which shows that the impeller blade tip made a greater effect on fluid. The circulation flow in the reactor with stirring forms more easily under the flow rate of 8.3 m/s.

Key words: numerical simulation; self-stirring; flow characteristics; reactor; pressure energy

湿法冶金所用的加压浸出属于高温加压条件下的水热反应过程, 它可使反应过程加快和改善金属的提取^[1-2]. 经过多年的发展, 加压浸出技术已在工业上得到多方面的应用. 如在氧化铝的提取、铜镍钴硫化物的处理、铂族金属回收、硫化锌精矿提取锌及难处理金矿预氧化等方面得到广泛应用. 近年随着湿法冶金技术的不断发展, 加压浸出技术在处理低品位多金属伴生矿中凸显出越来

越多的技术优势^[3-8]. 在高温高压的浸出反应器研究中, 强化浸出反应与抑制结疤是该类反应器研究的重点和核心问题. 在比较研究国内外多项浸出反应器和技术的基础上, 本文提出了一种自主研发的自搅拌的管式反应器, 该反应器通过高压流体自身能量推动搅拌器的旋转, 实现对反应介质的搅拌作用, 强化反应过程, 是一种新型的加压浸出反应器. 本文采用数值模拟技术, 对自搅拌

收稿日期: 2014-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51204040, U1202274, 51004033, 50974035); 国家高技术研究发展计划项目(2010AA03A405, 2012AA062303); 国家科技支撑计划项目(2012BAE01B02); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N100302005).

作者简介: 张子木(1984-), 男, 河南周口人, 东北大学博士研究生; 刘燕(1970-), 女, 湖南湘乡人, 东北大学教授.

反应器的流动特性进行研究,为该反应器的研发和应用提供技术支撑。

1 几何模型及网格划分

自搅拌管式反应器尺寸如下:反应器长 1 000 mm, 反应器直径 200 mm, 搅拌轴长 1 000 mm, 搅拌轴直径 30 mm, 叶片直径 170 mm, 厚度 30 mm, 入口和出口直径 16 mm. 具体结构如图 1 所示. 入口正对的搅拌桨为六弯叶涡轮桨, 作为驱动桨. 其他搅拌桨均为四斜叶桨, 作为从动桨. 该模拟共采用 120 万个网格, 其中对桨进行了加密处理. 搅拌桨结构及其网格划分情况见图 2.

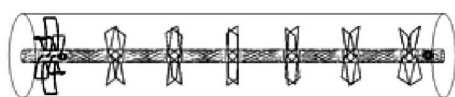


图 1 自搅拌管式反应器结构示意图
Fig. 1 Schematic of self-stirring reactor

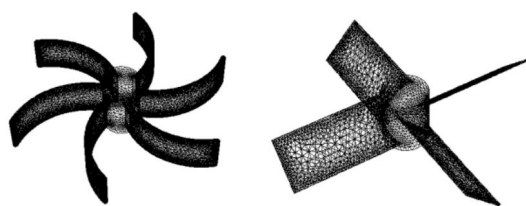


图 2 搅拌桨叶及其网格划分
Fig. 2 Stirring paddle and its meshing

2 边界条件的设定

- 1) 湍流模型选择为标准的 $k-\varepsilon$ 模型, 多相流模型选择 Eulerian 模型;
- 2) 速度压力耦合 SIMPLE 算法, 离散格式采用二阶迎风格式, 所有项的残差收敛标准为 10^{-3} ;
- 3) 反应器壁处采用壁面函数法^[9]处理, 取为固壁边界条件, 针对搅拌槽内部旋涡多的特点, 壁面采用非平衡壁面函数处理;
- 4) 桨叶区域采用多重参考系法处理;
- 5) 入口边界设为 Velocity inlet, 出口边界设为 outflow;
- 6) 采用纯水作为模拟原料, 入口流速分别选取 6.9, 8.3 m/s. 搅拌转速 50 r/min.

3 数值计算结果讨论

图 3 是不同液体流速下, 自搅拌管式反应器内部的速度分布云图. 由图可知, 不论是何种速度下, 反应器内部的速度分布均是从反应器边壁到

搅拌桨轴处呈递减趋势, 在搅拌桨轴处, 有小块的速度死区存在.

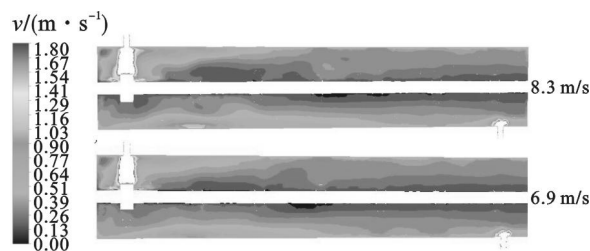


图 3 不同流速下的速度云图

Fig. 3 Velocity nephogram at different flow rates

图 4 则是不同流速下, 反应器内部的速度矢量图. 由图可知, 桨排开液体, 到达边壁后, 受到阻挡回落, 形成一个小的环流. 经计算得到不同液体流速下反应器的平均流速, 即液体流速 6.9 m/s 时的反应器平均流速约 0.3 m/s, 液体流速 8.3 m/s 时的反应器平均流速约 0.4 m/s.

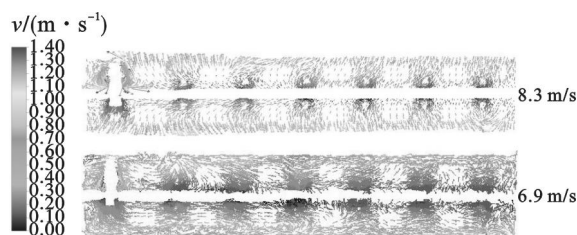


图 4 不同流速下的速度矢量图

Fig. 4 Velocity vectors at different flow rates

由图 3 和图 4 可以看出, 轴向靠近入口附近流速偏大. 随着流动的进行, 受到内部阻力等作用, 靠近出口的流速略微下降. 但在进、出口处流体流速普遍大于反应器中段的流体流速. 从速度矢量图可以看出, 流体流动紊乱, 说明在搅拌作用下, 整个流场处于湍流状态.

为了进一步研究反应器内部横向及径向位置速度变化情况, 选择径向截面 $z = 0.1$ m, $z = 0.5$ m, $z = 0.9$ m, 分别位于入口处动力桨附近位置、反应器中心从动桨位置、出口位置. 横向直线分别为 $y = 0.06$, $y = -0.06$, $x = 0.06$, $x = -0.06$, 对称位于轴的上方、下方及左侧、右侧, 如图 5 所示.

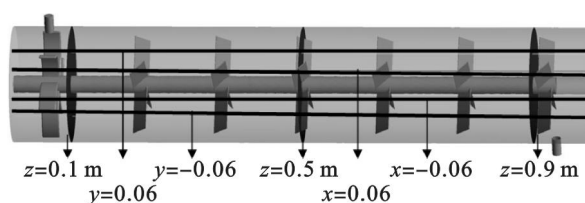


图 5 监测面及监测直线的位置

Fig. 5 Monitoring line and plane in axial position

图 6 和图 7 分别为入口流速 6.9, 8.3 m/s 时反应器内部不同截面径向速度云图.

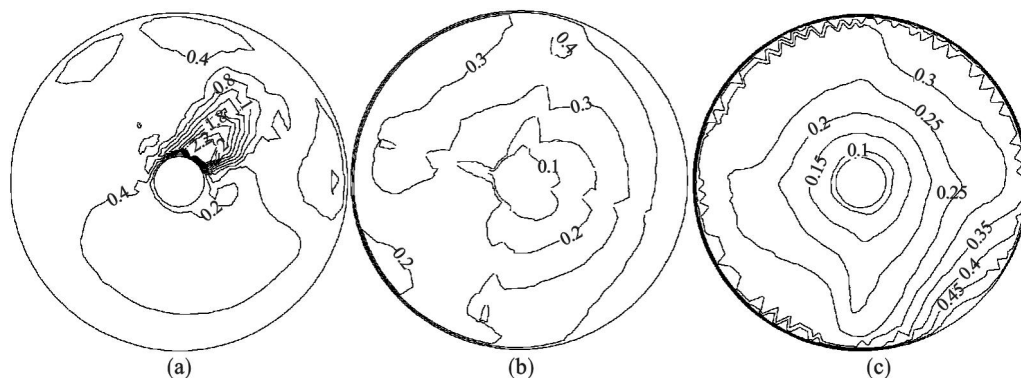


图 6 入口流速 6.9 m/s 时不同位置径向速度云图

Fig. 6 Circumferential velocity nephogram at inlet flow rate of 6.9 m/s

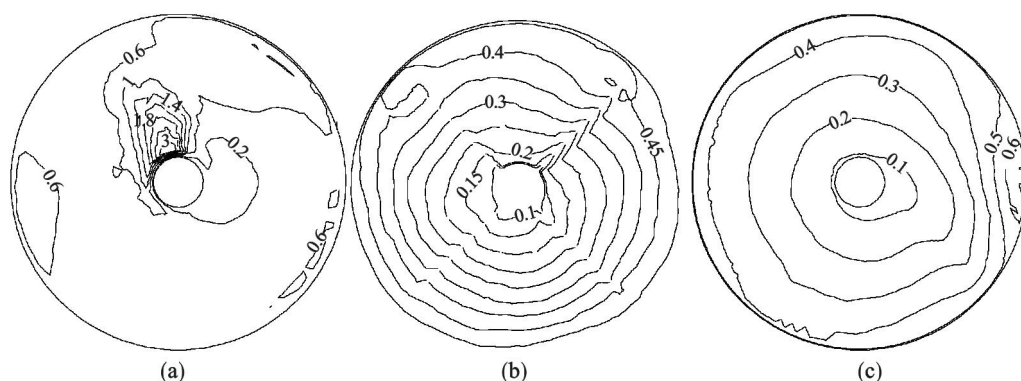
(a)— $z=0.1$ m; (b)— $z=0.5$ m; (c)— $z=0.9$ m

图 7 入口流速 8.3 m/s 时不同位置径向速度云图

Fig. 7 Circumferential velocity nephogram at inlet flow rate of 8.3 m/s

(a)— $z=0.1$ m; (b)— $z=0.5$ m; (c)— $z=0.9$ m

在不同流量下径向流体流动规律是一致的。其中在 $z=0.1$ m 截面处,即在靠近入口附近流体流速偏大,这与轴向的计算结果一致。且在反应器壁面附近的流速大于搅拌轴附近流速。流速最大的区域为入口与反应器衔接处。 $z=0.5$ m 和 $z=0.9$ m 截面处速度变化规律与 $z=0.1$ m 截面处相似,即越靠近搅拌轴,流动速度越小。其中 $z=0.9$ m 截面各处速度普遍小于 $z=0.5$ m 和 $z=0.1$ m 截面处,说明靠近出口速度下降。这与前面轴向计算结果一致。并且入口速度越大,在反应器内部越容易形成闭合环流,这有利于反应器内物质在搅拌作用下混合。

监测直线位置选择如图 5 所示,图 8a 为入口流速 6.9 m/s 时不同监测直线上速度变化情况,流体在入口处速度波动剧烈,在反应器的前半部分速度波动较明显;图 8b 为入口流速 8.3 m/s 时不同监测直线上速度变化情况,流体在入口处速度波动幅度更大,但很快达到平稳状态,并保持稳定,这说明适当地增大入口流速,利用反应器内部流体在搅拌作用下形成环流,能促进反应器内流体的混合。

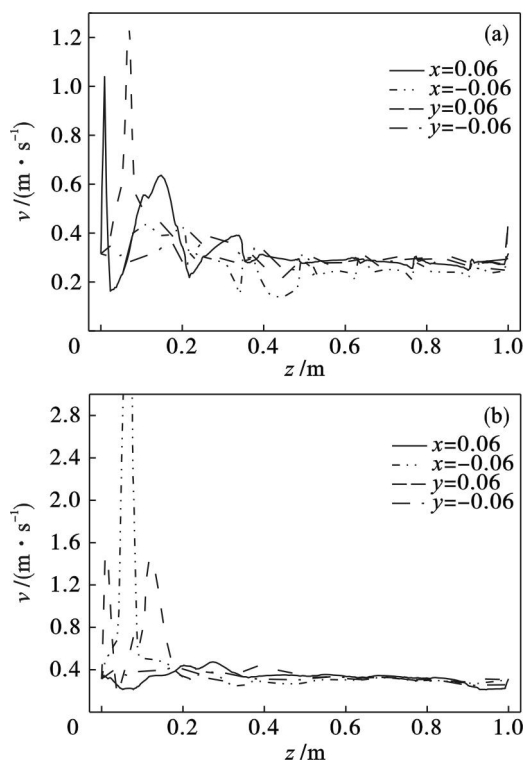


图 8 直线位置上速度变化

Fig. 8 Longitudinal variation of fluid velocity

(a)—6.9 m/s; (b)—8.3 m/s.

4 结 论

1) 在自搅拌管式反应器内分别选取入口流速 6.9, 8.3 m/s, 搅拌转速 50 r/min 时, 反应器入口和出口的流体由于受到扰动作用速度偏大, 轴向流速分布均匀, 相比入口而言, 靠近出口处速度偏低。

2) 自搅拌管式反应器内部液体速度由壁面到桨轴呈递减趋势, 说明搅拌桨叶端部对流体作用更大。

3) 入口流速 6.9 m/s 时反应器内平均流速约 0.3 m/s, 入口流速 8.3 m/s 时反应器内的平均流速约 0.4 m/s, 通过对反应器内横向直线及径向截面上速度变化的分析可知, 入口流速 8.3 m/s 时利于反应器内流体在搅拌作用下形成环流, 增大反应器内流体的混合效果, 对今后的两相混合实验提供理论指导。

参考文献:

[1] 柯家骏. 有色金属湿法冶金中加压浸出过程的进展[C]//

(上接第 951 页)

消耗, 并提高金属收得率, 降低钢铁料消耗, 并且, 脱磷阶段结束炉渣碱度控制越低, 相当于回收的 CaO 量越多, 能够实现的钢液去 Si 量也越多。

2) 低碱度脱磷渣可以有效改善炉渣的熔化性能, 当脱磷渣碱度控制在 1.2 ~ 1.8 范围时, 脱磷渣半球点温度基本可以控制在 1380 °C 以内, 炉渣中的游离 CaO 质量分数基本可以控制在 0.7% 的较低水平, 在转炉脱磷阶段冶炼温度下, 加入转炉内的石灰等可以充分熔化, 为转炉脱磷提供了前提条件。

3) 低碱度脱磷渣的矿物形貌大致分为 3 类: 灰色相、灰白色相和白色相, 灰色相为硅钙镁相, 分布面积广, 为基体相; 白色相为镁铁相, 呈无定形状, 杂乱分布于灰色相中; 灰白色相为中间相, 是蔷薇辉石或者是硅酸盐和镁铁相形成的复合相。

4) 随着脱磷渣碱度的降低, 脱磷阶段结束的倒渣量不断增加, 当炉渣碱度控制在 1.7 以内时, 对于 210 t 转炉倒渣量基本可以控制在 8 t 以上, 对于 100 t 转炉倒渣量基本可以控制在 5 t 以上。

参考文献:

[1] Ogawa Y, Yano M, Kitamura S, et al. Development of the

中国有色金属学会第三届学术会议论文集. 长沙, 1997: 160 - 166.

(Ke Jia-jun. Hydrometallurgy pressure leaching process progresses [C]//The Third Conference Proceedings of the Nonferrous Metals Society of China. Changsha, 1997: 160 - 166.)

[2] 廖德华, 刘汉钊, 李长根. 加压湿法冶金[J]. 国外金属选矿, 2006, 43(11): 10 - 15.

(Liao De-hua, Liu Han-zhao, Li Chang-gen. Pressure hydrometallurgy[J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*, 2006, 43(11): 10 - 15.)

[3] Xie H Y, Wang J K, Lu H, et al. Pressure leaching technique for manganese smelter dust[J]. *Hydrometallurgy*, 2013, 134(1): 96 - 101.

[4] Yu Z L, Xie K Q, Ma W H, et al. Kinetics of iron removal from metallurgical grade silicon with pressure leaching[J]. *Rare Metals*, 2011, 30(6): 688 - 694.

[5] Xu Z F, Li Q, Nie H P. Pressure leaching technique of smelter dust with high-copper and high-arsenic [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(1): 176 - 181.

[6] Liu K, Chen Q, Hu H, et al. Characteristics of scales formed from pressure leaching of Yuanjiang laterite [J]. *Hydrometallurgy*, 2011, 109(1): 131 - 139.

[7] Li X H, Zhang Y J, Qin Q L, et al. Indium recovery from zinc oxide flue dust by oxidative pressure leaching [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(1): 141 - 145.

[8] He S M, Wang J K, Yan J F. Pressure leaching of high silica Pb-Zn oxide ore in sulfuric acid medium [J]. *Hydrometallurgy*, 2010, 104(2): 235 - 240.

[9] Rafee R, Rahimzadeh H, Ahmadi G. Numerical simulations of airflow and droplet transport in a wave-plate mist eliminator[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2010, 88(10): 1393 - 1404.

continuous dephosphorization and decarburization process using BOF [J]. *Tetsu-to-Hagane*, 2001, 87(1): 21 - 28.

[2] Matsumiya T, Ichida M. Recent progress and topics in iron and steelmaking technology in Japan [C]//The 10th Japan-China Symposium on Science and Technology of Iron and Steel. Chiba, 2004: 1 - 11.

[3] Hashimoto T, Iiboshi H, Kume K, et al. Improvement in production capacity at Oita Works [R]. Oita: Oita Works, 2012.

[4] 王新华, 朱国森, 李海波, 等. 氧气转炉“留渣 + 双渣”炼钢工艺技术研究[J]. 中国冶金, 2013, 23(4): 40 - 46.

(Wang Xin-hua, Zhu Guo-sen, Li Hai-bo, et al. Investigation on “slag-remaining + double-slag” BOF steelmaking technology [J]. *China Metallurgy*, 2013, 23(4): 40 - 46.)

[5] Suito H, Inoue R. Thermodynamic assessment of hot metal and steel dephosphorization with MnO-containing BOF slags [J]. *ISIJ International*, 1995, 35(3): 258 - 265.

[6] Inoue R, Suito H. Mechanism of dephosphorization with CaO-SiO₂-Fe₂O₃ slags containing mesoscopic scale 2CaO · SiO₂ particles [J]. *ISIJ International*, 2006, 46(2): 188 - 194.

[7] Inoue R, Suito H. Phosphorous partition between 2CaO · SiO₂ particles and CaO-SiO₂-Fe₂O₃ slags [J]. *ISIJ International*, 2006, 46(2): 174 - 179.

[8] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 3 版. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 361.

(Huang Xi-hu. The metallurgy principle of ironmaking and steelmaking [M]. 3rd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004: 361.)

[9] 何肖飞, 王新华, 陈书浩, 等. 攀钢转炉双渣法脱磷的试验研究[J]. 钢铁, 2012, 47(4): 32 - 37.

(He Xiao-fei, Wang Xin-hua, Chen Shu-hao, et al. Experimental investigation on dephosphorization using double slag method in Pangang [J]. *Iron and Steel*, 2012, 47(4): 32 - 37.)

[10] Mason B. The constitution of some basic open-hearth slags [J]. *Journal of Iron and Steel Institute*, 1944(11): 69 - 80.