

徐宏祥,王永田,刘炯天,等.基于 PIV 浮选柱旋流场的测试与模拟[J].煤炭学报,2014,39(S1):212-218. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0812
Xu Hongxiang, Wang Yongtian, Liu Jiongtian, et al. Test and simulation on cyclonic flow field of flotation column based on the PIV [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1): 212-218. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0812

基于 PIV 浮选柱旋流场的测试与模拟

徐宏祥¹,王永田¹,刘炯天¹,邓小伟¹,程 敢²,李小兵¹

(1. 中国矿业大学 化工学院,江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院,北京 100083)

摘 要: 为深入探讨旋流段的流场分布及旋流分离的作用机理,以粒子图像测速系统(PIV)为基础构建了浮选柱旋流段的流场测试平台,利用 PIV 测试平台和 Fluent 数值模拟软件对旋流段内部的速度场进行了测试与数值模拟,研究了旋流段的速度分布规律以及循环量变化对速度分布规律的影响。结果表明,流场速度以切向速度为主,且有着明显的分布规律,径向速度比较小且分布比较复杂,轴向速度相对径向速度较大,速度分布呈对称分布;随着循环量的提高,轴向速度的零点向中心靠拢,而最大值出现在相近的半径位置。数值模拟结果和实验结论吻合度较高。

关键词: PIV 测试;速度分布;浮选柱;旋流场

中图分类号: TD923

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2014)S1-0212-07

Test and simulation on cyclonic flow field of flotation column based on the PIV

XU Hong-xiang¹, WANG Yong-tian¹, LIU Jiong-tian¹, DENG Xiao-wei¹, CHENG Gan², LI Xiao-bing¹

(1. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study of the flow field distribution and separation mechanism of cyclone section, the PIV test platform for cyclone section of flotation column was built base on the particle image velocimetry system(PIV) test in this paper. The velocity field in the cyclone section was tested particularly and numerical simulated using the PIV test platform and the numerical simulation software of Fluent. The velocity distribution regularity in the cyclone section was investigated. The influence of the velocity distribution which was impacted by circulation volume was researched. The results show that the tangential velocity is major part of the flow velocity and the distribution is regular. The radial velocity is small and the distribution is complex. The axial velocity is bigger than radial velocity. The velocity distribution is symmetrical distribution. With circulation volume increase, the zero point of axial velocity close to the center and the radius of the maximum value appear in the close position. The numerical simulation results are the same as the result of PIV test.

Key words: PIV test; velocity distribution; flotation column; cyclonic flow field

浮选柱本身的结构和原理决定了柱分选方法在
微细物料分选方面具有独特优势,并得到广泛应用。
中国矿业大学致力于旋流-静态微泡浮选柱^[1-4]的研
究、开发与应用研究,在浮选柱中引入离心力场强化浮

选,在旋流离心场中实现矿物浮选分离。与国内外其
他类型浮选柱相比,其选择性更好、回收率更高^[5-7]。
旋流段在旋流-静态微泡浮选柱中所起作用为分离出
最终尾矿与循环矿浆(循环矿浆经循环泵加压作为微

收稿日期: 2013-06-13 责任编辑: 张晓宁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51104158); 中国矿业大学(北京)博士研究生拔尖创新人才培养基金资助项目(00015Z633); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX13_954)

作者简介: 徐宏祥(1986—),男,山东东营人,博士研究生。E-mail: xuhongxiang001@163.com

泡发生器的动力源) 促进矿化气泡及未矿化气泡的升浮与弥散, 实现物料矿化的强化浮选^[8-11]。

目前, 对旋流-静态微泡浮选柱旋流段的作用机理研究较少, 深入探讨旋流段的流场分布及旋流分离作用机理有助于浮选柱的精确设计以及多样化矿物的精细分选^[12-14]。本文利用 PIV 测试技术和 Fluent 软件数值模拟深入研究分析浮选柱旋流段的流场速度分布规律。

1 实验

1.1 实验系统

实验系统包括浮选柱系统和 PIV 测试系统。浮选柱系统由旋流-静态微泡浮选柱、给料泵、循环泵等组成, 浮选柱规格为直径 100 mm、高 2 000 mm, 材质为有机玻璃。采用二维 PIV 系统(德国 Lavision)进行测试^[15-18]。示踪粒子采用直径约 10 μm 的空心玻璃珠。本实验测量的对象是旋流-静态微泡浮选柱旋流段, 旋流段入料口切向进入浮选柱柱壁处, 为单一旋流段入料管, 如图 1 所示。

1.2 测试方法

浮选柱在准静态环境下运行, 即未连续给料和出料的情况, 选取旋流段入料口中心截面、入料口截面上方 100 mm 截面和入料口截面下方 100 mm 截面作为待测横截面, 浮选柱底端作为 $H=0$, 以上 3 个待测截面分别表示为 $H=225, 325, 125$ mm。

1.3 模拟方法

数值模拟选用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 利用 Fluent 软件进

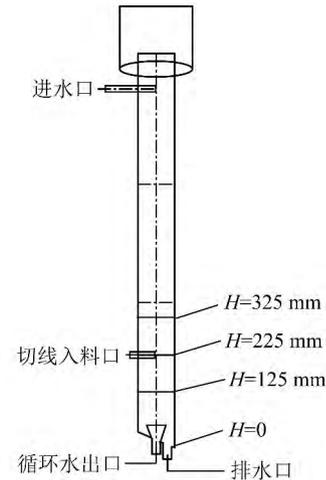


图 1 旋流-静态微泡浮选柱结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of FCSMC

行数值模拟^[9-11]。柱体边界条件为高度 2 000 mm、直径 100 mm、循环压力 0 ~ 0.8 MPa、切向入料速度 0 ~ 0.859 633 m/s、水相物性参数为密度 998.23 kg/m³、动力黏度 1.005 MPa·s。

2 结果与分析

2.1 流场 PIV 测试

2.1.1 $H=225$ mm 横截面的速度分布规律

不同循环量条件下 $H=225$ mm 横截面上合速度的测试结果如图 2 所示, 其中 $x=0$ 为浮选柱中心位置, x, y 分别为与横截面平行、竖直方向上距浮选柱中心线的距离。

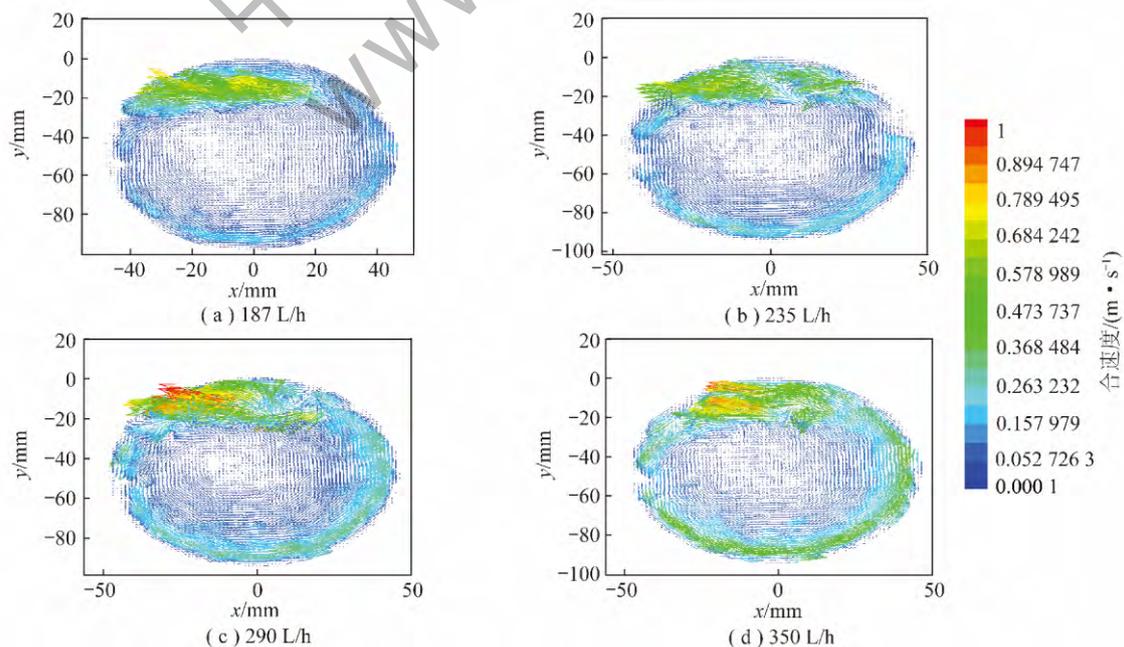


图 2 不同循环量条件下 $H=225$ mm 横截面上的合速度矢量图

Fig. 2 Resultant velocity vector diagram of $H=225$ mm cross section in different circulation volumes

由图 2 可知, $H=225$ mm 横截面是旋流段入口中心所在的截面, 速度损失比较小, 使得该截面的速度值最大。流体进入浮选柱时直接冲击在柱壁面上做顺时针旋转运动, 由于受到浮选柱壁的摩擦和流体之间的拖拽, 其速度越来越小。在整个断面上, 除了旋

流段入口口处, 其他位置的流体速度基本上呈近似对称分布。由于流体的黏滞性, 紧贴壁面的流体质点将黏附在柱体的壁面上, 速度几乎为 0。

不同循环量下, 中心纵截面与 $H=225$ mm 截面的交线上速度测试结果如图 3 所示。

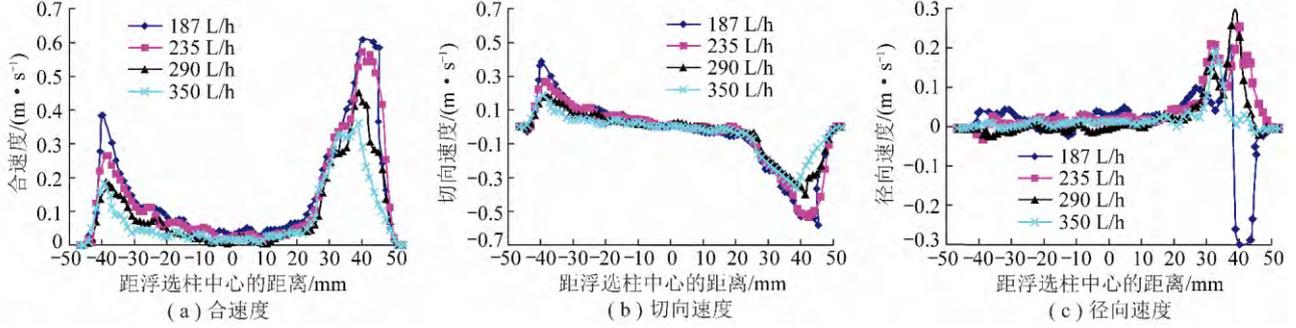


图 3 速度分布

Fig. 3 Distributions of velocity

由图 3 可知, 切向速度与合速度的大小及变化趋势基本相同, 都在 $0 \sim 0.7$ m/s, 可见切向速度是合速度的最主要组成部分, 切向速度确保旋转流的稳定, 并决定整个旋流段的分选分离环境。受浮选柱直径限制, 径向速度整体值较小且多在 0.1 m/s 以下, 分布规律比较复杂。

边界层的影响开始降低。在 4 个不同循环量下 3 个截面上的速度均类似“M”型变化, 即两端和中间的速度存在极小值点, 在中心的两侧有近似对称的极大值点。切向速度最大值的位置随着循环量的提高, 距中心的距离也增大, 表明随着入料速度的增大, 流体的旋转半径变大, 边界层变薄。径向速度分布变化规律比较复杂, 参见文献 [19-20]。

切向速度分布规律: 从浮选柱壁面开始径向向内, 切向速度是从 0 开始增加, 在距中心约 40 mm 处达到最大值, 然后逐渐降低, 在中心处为 0; 从中心处径向向外, 切向速度开始增加, 直至最大值, 然后由于

2.1.2 $H=325$ mm 横截面的速度分布规律

不同循环量下, $H=325$ mm 横截面上的速度测试结果如图 4 所示。

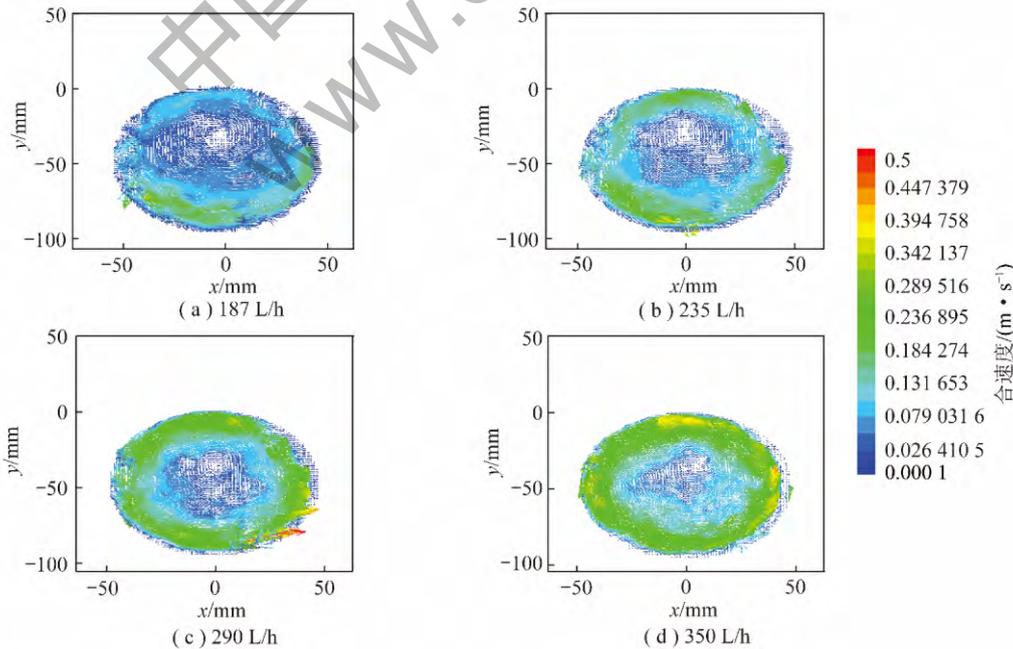


图 4 不同循环量条件下 $H=325$ mm 横截面上的合速度矢量图

Fig. 4 Resultant velocity vector diagram of $H=325$ mm cross section in different circulation volumes

从图 4 可知, 该截面速度最大速度为 0.5 m/s, 图中颜色相同的区域相对较大, 截面速度变化相对平

缓。而且断面中心速度接近于 0 的区域逐渐缩小, 在循环量为 350 L/h 时基本上消失。

速度的分布规律: 除边界层外, 靠近边界层向内的位置速度较大, 且比较均匀, 为大约宽 10 mm 的环形区域, 循环泵转速越大时这个环形区域的面积越大, 向内则流体的速度是逐渐减小的, 最后在中心处速度降至接近为 0, 该区域的面积为不规则的。

2.1.3 $H=125$ mm 横截面的速度分布规律

从图 5 可知, 该横截面的速度分布与 $H=325$ mm 截面比较相似, 最大速度值都为 0.5 m/s 左右, 在该截面上随循环量的提高整个速度的变化比较明显, 断面中心速度接近于 0 的区域随循环泵转速的提高逐渐缩小, 在循环量为 350 L/h 时基本上消失。

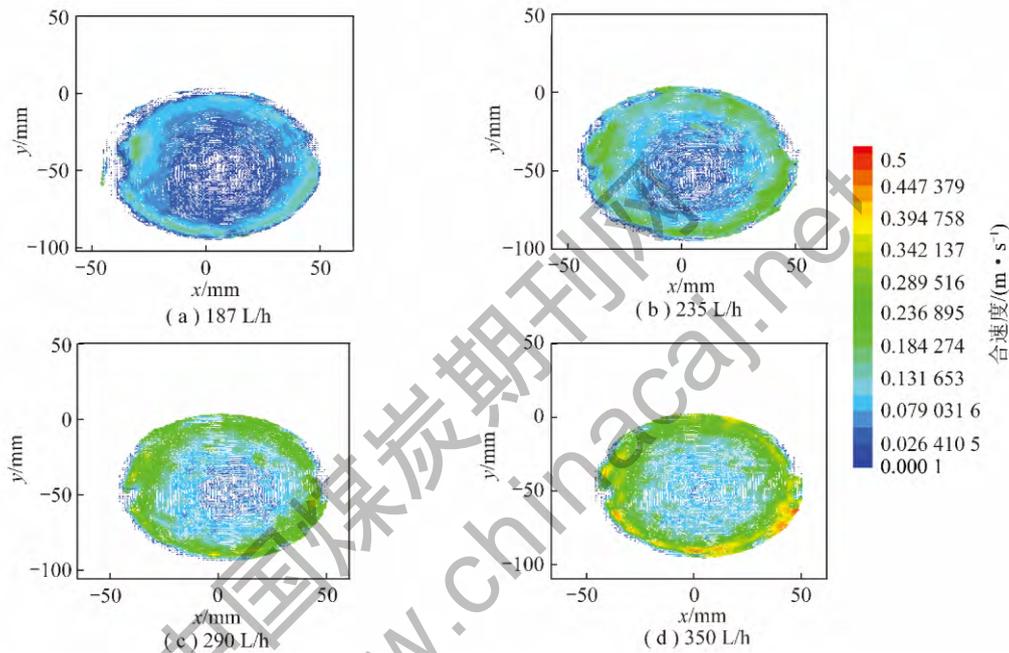


图 5 不同循环量条件下 $H=125$ mm 横截面的合速度矢量图

Fig. 5 Resultant velocity vector diagram of $H=125$ mm cross section in different circulation volumes

2.1.4 循环量对速度分布的影响

不同循环量下, 旋流段入料口附近中心轴线处纵截面速度场的测试结果如图 6 所示, 其中 x' 、 y' 分别为纵与截面平行、竖直方向上距浮选柱中心线的距离。

由图 6 可知, 纵截面上右侧速度要大于左侧速度, 两边的速度大于中间的速度。单旋流入料口使得截面上流场分布不对称。在旋流入料口截面处的流体大部分处于低速运动状态下, 随着高度的上升, 低速区慢慢向中心逐渐缩小, 旋流入料口附近内部的低速区较大, 越往下其低速区不断减小。同时入料口处下方区域的流体速度要大于上方区域。纵截面上轴向速度绝大多数都是在 0.1 m/s 以下。在入料口横截面处轴向速度为 0, 入料口以上区域两端的轴向速度为负值(方向向上), 中间的轴向速度为正值(方向向下); 入料口以下的区域两端的轴向速度为正值(方

图 4 和图 5 中, 中心速度为 0 的蓝色区域都是稍微偏心的, 但偏心的位置不同, $H=125$ mm 截面更靠近中心, 而 $H=325$ mm 截面是靠左上偏心。由于流体在垂直方向上做螺旋运动时, 在循环泵抽吸的作用下使流体向下运动, 再加上底部漏斗的中心和柱体的中心完全重合, 使得该截面速度为 0 的区域更靠近正中心。相对于 $H=325$ mm 两个截面, $H=125$ mm 截面上的速度分布更为对称, 在旋转运动过程中能量逐步耗散, 单循环入料口对流场分布的影响越来越小, 使得距离入料口越远截面的速度分布更具有对称性^[21]。

向向下), 中间的轴向速度为负值(方向向上)。在入料口以下的区域外围主要为下降流, 约占半径的 1/3 左右, 在下降流包围的内部区域为轻微的上升流。在入料口以上的区域外围主要为上升流, 但速度非常小, 被外围包裹的内部区域主要为下降流。上升流和下降流中间存在有一条零速的分界面^[22]。

2.2 流场的模拟

2.2.1 横截面速度分布规律

利用 Fluent 软件模拟验证实验的数据, 对横截面的选取对象 ($H=225, 325, 125$ mm) 与实验部分保持一致。数值模拟计算的等值线云图和矢量图如图 7 所示。

由图 7 可知, 3 个截面上流体是朝着同一个方向旋转的, 等值线云图上横截面最外围是蓝色, 表明柱壁上的速度是 0, 随着距离中心点越近, 速度先增大后减小, 到中心附近减小为 0, 表明中心处的流体没

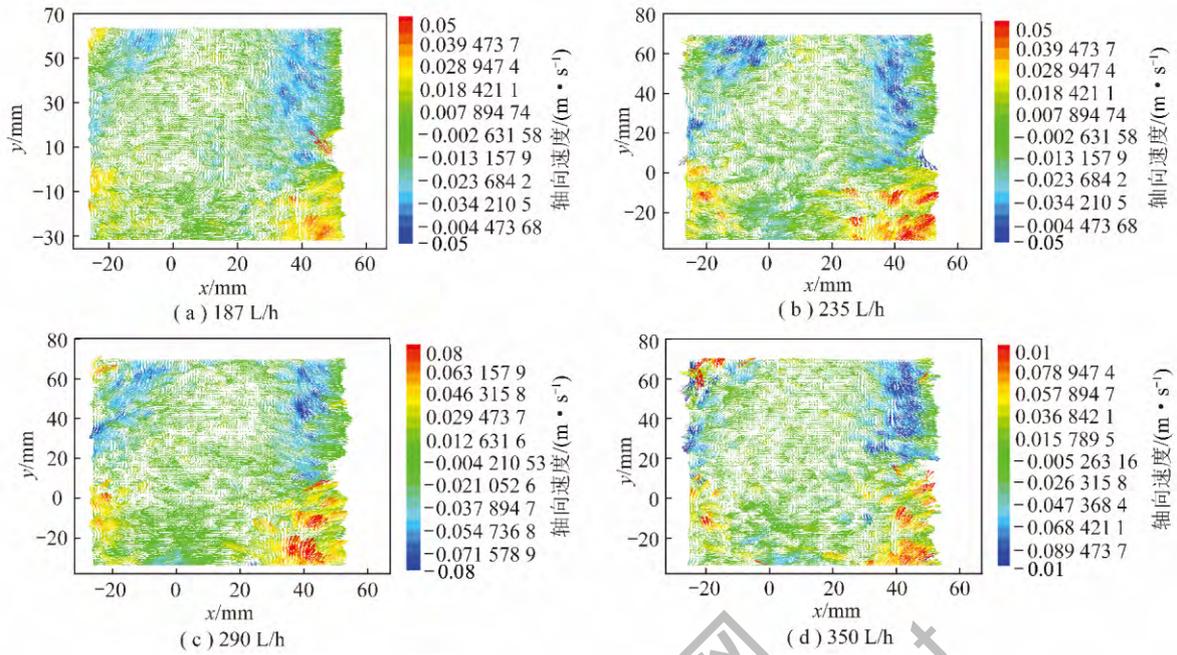


图 6 中心纵截面的轴向速度矢量图

Fig. 6 Axial velocity vector diagram of center longitudinal profile in different circulation volumes

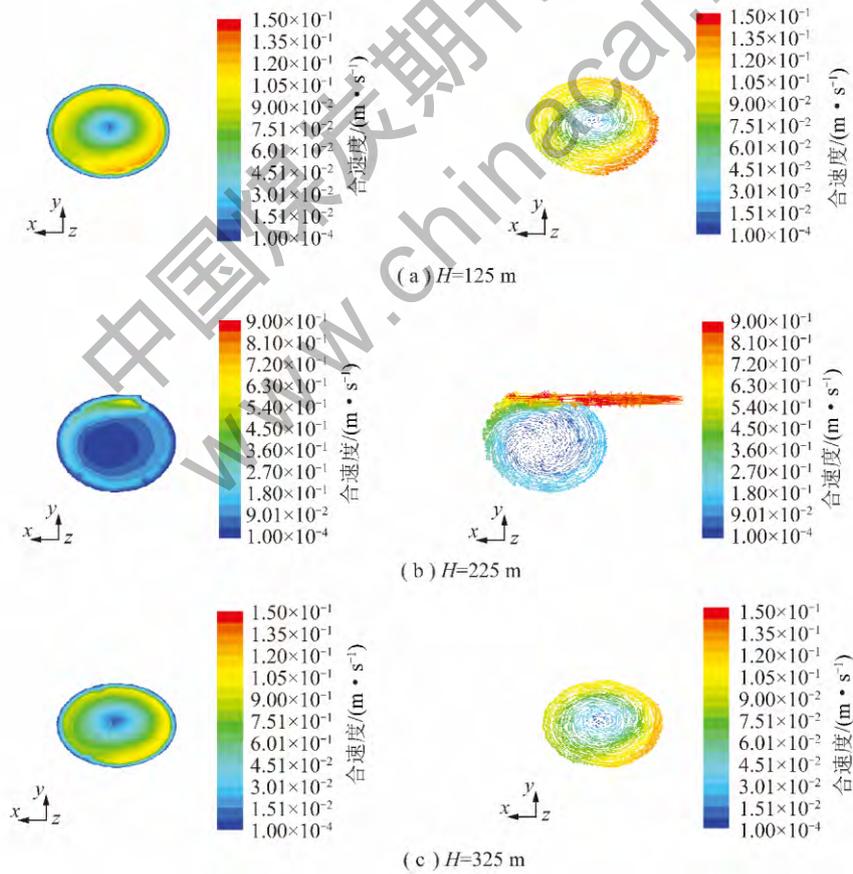


图 7 $H=125$ 225 和 325 mm 处横截面的合速度等值线云图和矢量图

Fig. 7 Resultant velocity contour and vector diagram of $H=125$ 225 and 325 mm cross sections

有发生旋转。 $H=225$ mm 截面是入料口所在的截面，该截面上的切向速度最大，旋转着向上或向下运动，而在径向上的移动较小，使得该截面上中心蓝色区域

较大，表明流体没有旋转。 $H=325$ mm 和 $H=125$ mm 截面上由于流体的能量向中心处传递，所以中间低速区的面积越来越小，中心附近的流速保持最低。这与

PIV 测试结果相吻合。

2.2.2 中心纵截面轴向速度分布规律

由图 8 可知,中心纵截面上轴向速度为正,表示向上运动;中心纵截面上轴向速度为负,表示向下运动。以旋流入料口截面为界,该截面以上,外围的轴向速度向上,内部的轴向速度向下,在 $H > 700$ mm 时轴向速度几乎为 0;在 $75 \text{ mm} < H < 700$ mm 的区域,外围的轴向速度向下,内部的轴向速度向上,存在着一条轴向速度为 0 的分界线,整体轴向速度较小,在 0.1 m/s 以下。

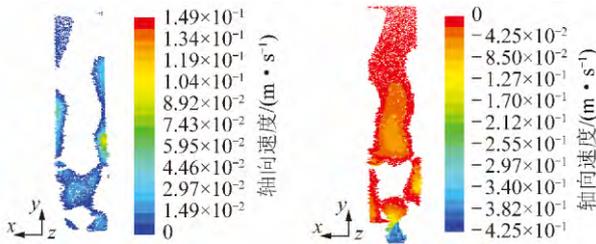


图 8 中心纵截面轴向速度矢量图

Fig. 8 Axial velocity vector diagram of center longitudinal profile

由图 9 可知,左侧的轴向速度较右侧的轴向速度稍大。 $H = 225$ mm 和 $H = 75$ mm 截面上轴向速度很小,接近于 0,在右半轴处有向下运动的趋势。因为 $H = 225$ mm 截面是旋流入料口所在截面,刚进入旋流段的流体以切向速度为主,使得流体做强烈旋转运动,轴向方向上的速度极小;而 $H = 75$ mm 截面是轴向速度向上、向下的径向上分界点。除 $H = 75$ mm 外,轴向速度最大值出现在大约相同的半径处 (44 mm)。因为循环泵的作用在底部漏斗处大部分流体都是竖直向下流出旋流段的^[23], $H = 75$ mm 轴向速度的最大值出现在正中心处。

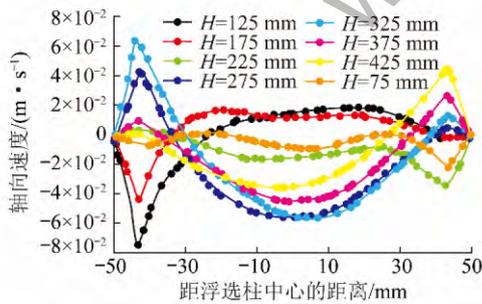


图 9 中心纵截面与不同高度横截面交线上的轴向速度

Fig. 9 Axial velocity diagram of intersecting line with center longitudinal profile and different height cross sections

2.2.3 循环量对切线速度的影响

由图 10 可知,不同循环量条件下切向速度的分布规律比较相似,出现以最大切向速度为分界线的内外涡。切向速度的最大值分别出现在 42.1, -40.0, 43.1 mm 和 43.2, 45.4, 45.1 mm 处,随着循环量的增

大,切向速度的最大值越来越靠近柱壁,外围类自由涡逐渐变薄^[24]。

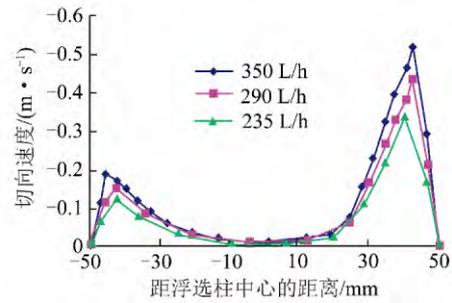


图 10 不同循环量下中心纵截面与 $H = 225$ mm 截面交线上的切向速度

Fig. 10 Tangential velocity diagram of intersecting line with center longitudinal profile and $H = 225$ mm cross section in different speed conditions

2.2.4 循环量对轴向速度的影响

由图 11 可知,不同循环量条件下,轴向速度的最大值就是出现在相同半径处。轴向速度随着循环量的提高而增大,且轴向速度的零点逐渐向中心靠拢。这与 PIV 测试结果一致。

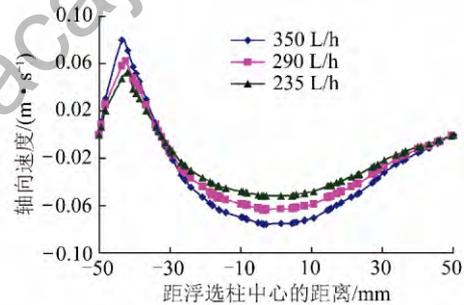


图 11 不同循环量下中心纵截面与 $H = 275$ mm 横截面交线上的轴向速度

Fig. 11 Axial velocity diagram of intersecting line with center longitudinal profile and $H = 275$ mm cross section in different speed conditions

3 结 论

(1) 构建了以 FCSMC 为主以及配套循环泵构成的浮选柱系统,以标准配置的 PIV 测速系统进行测试。研究表明:其内部流体的速度以切向速度为主,且有着明显的分布规律,径向速度比较小,且分布比较复杂,轴向速度相对径向速度较大,也有一定的规律可循。

(2) 切向速度:旋流段内部流体是以同一方向切向速度进行旋转运动,在浮选柱边壁和中心处速度为最小,接近于 0,在一定半径处存在着切向速度的最大值,不同高度的最大切向速度出现在大约相同的半径处。忽略单一入料口因素的影响,则速度分布呈对

称分布。以切向速度的最大值点为界形成内外两个漩涡,外围是类自由涡,内部是类强制涡。随着循环入料速度的增大,流体的旋转半径变大边界层变薄。旋流入料口以下横截面的切向速度要大于入料口以上截面的切向速度。

(3) 轴向速度: 入料口靠上横截面外围的轴向速度向上,而中间靠近中心的轴向速度向下; 入料口靠下区域外围的轴向速度向下,而中间靠近中心的轴向速度向上。在 $H=75$ mm 径向上存在轴向速度为 0 的点。随着循环量的提高,轴向速度的零点向中心靠拢,而最大值出现在相近的半径位置。

(4) 数值模拟得出的结果和实验结论吻合度较高,说明数值模拟选择的湍流模型及相关算法是正确的。

参考文献:

- [1] Liu J T. Cyclonic-static micro-bubble flotation apparatus and method [P]. United States Patent: 6 073 775 2000-06-13.
- [2] 刘炯天. 旋流-静态微泡浮选柱及洁净煤制备研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 1998.
Liu Jiongtian. Research on cyclone-static microbubble flotation column and clean coal preparation [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 1998.
- [3] Liu J T, Zhang M, Li Y F, et al. Research on pressure drop performance of the packing-flotation column [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 16(4): 389-392.
- [4] 张敏, 刘炯天. 筛板充填浮选柱的气泡行为及其影响因素[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(6): 766-769.
Zhang Ming, Liu Jiongtian. Bubble behaviors and influencing factors of the sieved-flotation column [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(6): 766-769.
- [5] Wang H L, Zhang Y H, Wang J G, et al. Cyclonic separation technology: Researches and developments [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2012, 20(2): 212-219.
- [6] Yang Q, Wang H L, Liu Y, et al. The coordinated relationship between vortex finder parameters and performance of hydro cyclones for separating light dispersed phase [J]. Separation and Purification Technology, 2011, 79(3): 310-320.
- [7] 宋云霞, 齐正义, 赵龙. 应用 PIV 技术对重介质旋流器流场的试验研究[J]. 选煤技术, 2010, 34(2): 36-30.
Song Yunxia, Qi Zhengyi, Zhao Long. Application of PIV technology to study flow field in dense medium cyclone [J]. Coal Preparation Technology, 2010, 34(2): 36-30.
- [8] 秦二伟, 刘伟, 包欣, 等. PIV 实验两个重要问题的讨论[J]. 建筑热能通风空调, 2009, 28(2): 83-85.
Qin Erwei, Liu Wei, Bao Xin. Discussion of two important problem of PIV experiment [J]. Building Energy & Environment, 2009, 28(2): 83-85.
- [9] Desse M, Mitchell J, Wolf B, et al. Droplet deformation and break-up under shear: Hydrocolloid solution vs suspension of starch granules [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(3): 495-502.
- [10] Yang Q, Wang H L, Liu Y, et al. Solid/liquid separation performance of hydrocyclones with different cone combinations [J]. Separation and Purification Technology, 2010, 74(3): 271-279.
- [11] Aganda A A, Coney J E R, Sheppard C G W. Airflow maldistribution and the performance of a packaged air conditioning unit evaporator [J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20(6): 511-528.
- [12] 沈熊. 激光多普勒测速技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 189-234.
Shen Xiong. Laser doppler velocimetry and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 189-234.
- [13] Sous D, Sommeria J. A Tsai's model based S-PIV method for velocity measurements in a turbulent Ekman layer [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2012, 26: 102-110.
- [14] Wieneke B, Pfeiffer K. Adaptive PIV with variable interrogation window size and shape [A]. 15th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics [C]. Lisbon, 2010: 243-247.
- [15] Field R W, Zhang K S, Cui Z F, et al. Flatsheet MBRs: Analysis of TMP rise and surface mass transfer coefficient [J]. Desalination and Water Treatment, 2011, 35(1-3): 82-91.
- [16] 张颖, 石常省, 刘炯天. 旋流-静态微泡浮选柱旋流力场的数值模拟研究[J]. 选煤技术, 2009, 33(1): 15-17.
Zhang Ying, Shi Changsheng, Liu Jiongtian. Numerical simulation study on vortex force field in vortex-static micro-bubble flotation column [J]. Coal Preparation Technology, 2009, 33(1): 15-17.
- [17] Lane G L, Schwarz M P, Evans G M. Numerical modeling of gas-liquid flow in stirred tanks [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(7): 2003-2014.
- [18] 吕玉庭, 王劲草. 离心力场的浮选机理与浮选实践[J]. 洁净煤技术, 2009, 15(2): 28-31.
Lü Yuting, Wang Jincuo. The floatation mechanism under centrifuge field [J]. Clean Coal Technology, 2009, 15(2): 28-31.
- [19] Zhang K S, Wei P, Yao M, et al. Effect of the bubbling regimes on the performance and energy cost of flat sheet MBRs [J]. Desalination, 2011, 283: 221-226.
- [20] Liu D S, Wang S D. Gas-liquid mass transfer in Taylor flow through circular capillaries [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(4): 2323-2330.
- [21] 周晓华. 浮选柱的旋流分选机理与矿物分选实践[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2005: 41-58.
Zhou Xiaohua. Study on the cyclonic separation mechanism of column flotation and its application in mineral processing [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2005: 41-58.
- [22] Liu L, Li W W, Sheng G P, et al. Microscale hydrodynamic analysis of aerobic granules in the mass transfer process [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(19): 7555-7560.
- [23] Liu L, Sheng G P, Liu Z F, et al. Characterization of multiporous structure and oxygen transfer inside aerobic granules with the percolation model [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(22): 8535-8540.
- [24] 邱冠周. 颗粒间相互作用与细粒浮选[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1993: 53-58.