

煤炭加工

现代光学测量技术在矿物浮选中的应用及展望

刘煜, 闫小康, 王利军, 曹亦俊, 王爱, 许亚军, 张秀宝, 石瑞

(中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221008)

摘要:为了解现代光学测量技术在细粒矿物浮选中的应用,在深入研究浮选理论的基础上,分析了以往研究浮选过程的测量方法,提出了近年来最为先进的流体力学光学测量技术PIV和高速动态显微摄像技术,利用其测量的高精度、高分辨率、无干扰等优势,可以实现对宏观、微观尺度的复原流场、矿化过程的测量。PIV可展现流场的流态,得到所需的各种指标、参数;高速动态显微摄像技术可直观观察到颗粒气泡在流场中运动、矿化过程。利用现代光学测量技术可深入研究流体动力学和选矿,实现流场稳定和最佳流态,也可研究强化矿化微观过程,最终实现浮选动力学的改进和分选指标的最优化。

关键词:矿物浮选;PIV;高速动态显微摄像技术;现代光学测量

中图分类号:TD9 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)01-0001-06

Application and forecast of modern optical measurement technologies in mineral flotation

LIU Yu, YAN Xiaokang, WANG Lijun, CAO Yijun, WANG Ai, XU Yajun, ZHANG Xiubao, SHI Rui

(School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In order to investigate the application of modern optical measurement technologies in fine mineral flotation, the previous measurement methods of flotation process were discussed based on the flotation theory. The most advanced PIV fluid mechanics optical measurement technology and high-speed dynamic microscopic camera technology which had the advantages of high precision, high resolution ratio and non-interference were introduced. The two advanced technologies could measure the recovery of flow field and mineralization process on macro and micro point. The PIV technology could show the flow pattern of flow field, various indicators, parameters. The high-speed dynamic microscopic camera technique could directly observe particles bubble motion in the flow field and the mineralization process. The modern optical measurement technologies were beneficial to stabilize flow field and optimize separation index.

Key words: mineral flotation; PIV; high-speed dynamic microscopic camera technology; modern optical measurement

0 引言

浮选是根据矿物不同的物理化学性质,通过在矿浆中加入多种化学药剂,鼓入空气产生气泡,选择性地带着与气泡黏附的矿粒上升至矿浆表面,堆积的精矿泡沫通过溢流口流出回收矿物的技术^[1]。

矿物资源的贫细杂化对浮选提出了更高的要求,必须对浮选的基础理论进行深入研究以提高浮选效率。影响浮选过程的因素很多,流体力学是浮选的基础。研究流体力学和选矿的结合,实现流场的稳定与最佳流态,通过研究强化矿化微观过程,可实现浮选动力学的改进,获得最优化的分选指标。

收稿日期:2016-03-31;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.01.001

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2012CB214905);国家自然科学基金资助项目(51404264);国土资源部公益性行业科研专项资助项目(201511071-3)

作者简介:刘煜(1992—),男,宁夏中卫人,硕士研究生,从事浮选流体力学方面的研究。E-mail:1485589549@qq.com。通讯作者:闫小康,讲师,博士。E-mail:xk-yan@cumt.edu.cn

引用格式:刘煜,闫小康,王利军,等.现代光学测量技术在矿物浮选中的应用及展望[J].洁净煤技术,2017,23(1):1-6.

LIU Yu, YAN Xiaokang, WANG Lijun, et al. Application and forecast of modern optical measurement technologies in mineral flotation[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(1): 1-6.

宏观上矿浆的流态、气泡分布、速度等宏观特征决定了颗粒与气泡的分布状态;对于浮选的微观过程,气泡与矿物颗粒之间的碰撞、脱附受制于周围的微观流体环境,如适当的湍流可以提高颗粒、气泡的碰撞,但过高的湍流强度则容易使矿粒脱附。测量矿浆流场中颗粒、气泡速度、湍流强度与矿物颗粒、气泡的分布特性以及运动规律,及其与浮选过程中分选性能指标、操作变量之间的关联问题亟待解决^[2-4]。若能直观“看”到矿浆的运动形态以及气泡和矿粒的运动轨迹、作用过程,可从问题的本质出发研究矿物浮选过程。从现有的流体测量手段来说,能够完成矿浆流场测量的手段主要有热线测量、电导探头^[5],以及依靠被测介质的电学特性进行区分的粒度检测技术(EDT)、层析成像技术(ECT)^[6],但缺点也很明显,如利用热线仪器测量时对流场的干扰及空间单点测量的局限性,EDT、ECT测量时空间分辨率低等不足。粒子成像测速(PIV)和高速动态显微摄像技术是近些年兴起的较为先进的流体力学光学测量技术,在矿物浮选领域应用较少,利用其测量具有高精度、高分辨率、无干扰等优势,可实现对宏观、微观尺度的浮选流场、矿化过程的测量。笔者论述了PIV及高速动态显微摄像技术在浮选基础研究领域中的应用,包括测量原理、功能、测量方法、测量结果,并进行举例分析,以促进国内选矿领域湿法分选机理的研究。

1 测量原理

1.1 PIV 测量原理

PIV技术的原理如图1所示。先在流场中布撒适量的示踪粒子,示踪粒子需对被测流体有较好的跟随性,且对光有很好的散射作用,从而可被激光轻易照亮,这样可以测量粒子在流体中的速度,从而代表其所在流场内相应位置点的流体质点的速度^[7-10]。待进入流场的示踪粒子分散均匀后,使用激光器产生光束经透镜散射后形成厚度为1 mm的片光源,入射到流场待测区域照射待测流场中一个截面,在同步器的控制下同时开启双曝光照相设备,记录2次曝光时粒子在流场中的空间坐标,再通过图形互相关算法^[11]计算出粒子的位移,根据曝光时间间隔求出粒子的速度及方向,处理得到速度流线图、矢量图等。

1.2 高速动态显微摄像机测量原理

高速动态显微摄像是记录流体运动变化过程中

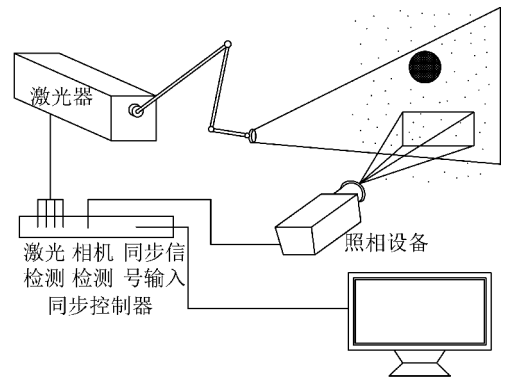


图1 PIV技术原理

Fig. 1 PIV technology principle

空间、时间的信息,对空间与时间一起进行图像记录的摄影方法。具有极高的时间分辨率是其与一般摄影最根本的区别,高速动态显微摄像机能跟踪并记录目标快速变化的发展过程。其原理是利用连续的摄影方式将微粒的运动轨迹拍摄下来,通过记录分析微粒的移动距离、位置,利用软件计算出微粒移动的速度、加速度。高速摄像机可在相对短的时间内完成对目标高速运动过程中的快速与多次采样,并将这一过程以常规速度放映,其所记录的变化过程可缓慢、清晰地呈现在视野中^[12-13]。高速动态显微摄像机的突出优点是具有实时目标捕获、图像快速记录、即时回放、图像直观清晰等。结合显微测量技术,还可以对肉眼无法识别的微型颗粒进行放大、成像,获得微观运动特征。

2 测量方法

2.1 PIV 测量方法

PIV系统主要由成像系统、分析显示系统和同步控制器组成^[14-16]。

1) 成像系统。激光源,即激光发生器,可产生双脉冲激光,照亮较大的流场测试区域,激发示踪粒子产生反射光,从而被相机捕集。通过控制双脉冲之间的曝光时间可以实现不同流速下的流场测试。片光源光学系统由柱面镜、球面镜2部分组成,通过球面镜可调整激光片光光腰的厚度。光腰附近的片光源强度最集中,试验时,将光腰调整到待测流场区域附近,以保障示踪粒子的反光性良好。图像捕集装置是双曝光CCD高分辨率数字照相机,可以实现镜头连续曝光,并将粒子图像记录下来,传输到电脑的图像处理系统中。CCD根据测量流场的区域,选择微距镜头或焦距较短的镜头;当测量区域过大时,应进行分区测量^[17-19]。

2)分析显示系统。PIV 目前采用的是互相关分析法。数据经过处理后,得到所需的各类图像信息以及速度场的显示。

3)同步控制器。用于控制 PIV 系统中激光器与 CCD 相机的触发,实现激光在激发的同时 CCD 相机自动启动进行图像拍摄。主要的测试步骤:第 1 步,在待测流场中加一定浓度的示踪粒子;第 2 步,相机及激光片光源发生器的标定,标定待测流场中的一个截面,使相机捕捉到该截面呈现清晰的画面,且截面与激光片光源发生器的片状激光在同一截面上;第 3 步,利用同步器使激光与相机同步进行;第 4 步,分析和处理数据。

需要注意的是考虑 PIV 拍摄的透光性要求,试验设备的拍摄区域要做透光处理,材料根据难易程度选用玻璃或有机玻璃;拍摄流场为非平面时,要设置方形的光学补水盒;在进行相机标定时如果周围环境光线不足,需添加人工光源,但不得对准镜头,防止 CCD 中感光元件烧毁;试验时需在暗室中进行,且待测流场背景也必须是暗色(最易为黑色);开启激光器后,人眼不可直视激光,需佩戴激光试验配套的眼镜;试验结束后必须将激光强度关闭到最小后再进行后续处理。

2.2 高速动态显微摄像机测量方法

单台相机可以实现单个或多个气泡(颗粒)单相或多相运动变化过程的拍摄,探究气泡(颗粒)在不同流场的运动规律,也可测量气泡或颗粒的粒径。如果要测量气泡(颗粒)三维轨迹,需要 2 台相机呈 90°拍摄不同面,用立体物体做三维空间标定,2 台相机用功能连接器电缆连接,实现同步拍摄及停止。用软件处理得到需要的三维轨迹图、速度分析和运动规律。

需要注意的是,测量之前,要根据被测颗粒或气泡的尺寸、运动速度,设置摄像机的拍摄频率及范围,力求准确、清晰地获取拍摄对象的运动信息。

3 应用举例

3.1 PIV 应用情况

PIV 技术在研究气液两相方面有诸多应用^[20-21]。李楠等^[22]采用 PIV 技术对 XFD-1.5L 浮选机流场进行测定,揭示了浮选机流场特征。徐宏祥等^[23]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,数值模拟结果和试验结论吻合度较高。黄亚飞^[24]借

助先进的 PIV 技术对上升流水力分选机各个区域的流场流态进行测量,并通过试验说明了利用 PIV 技术对上升流水力分选进行测量的可行性。中国矿业大学在矿物浮选设备内部的流体力学测量上已有多年的积累,徐宏祥等^[23]利用 PIV 测试平台研究了浮选柱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;闫小康等^[25]使用 PIV 测量技术对旋流-静态微泡浮选柱的清水-气泡两相流场从宏观和微观两方面进行研究;Wang 等^[26]利用 PIV 测量浮选柱单相流场,研究了微泡浮选柱中锥角对流场的影响。

笔者以中国矿业大学开发研制的旋流-静态微泡浮选柱^[25]为例进行实验室 PIV 拍摄,其结构如图 2 所示。浮选柱在检查安全性后注满清水,并在循环泵的抽吸作用下运行,清水从底部抽出增压后在管中流动,经过安装在柱体外部管道上的气泡发生器时,由于高速水流通过气泡发生器喉管时产生负压吸入一定量空气,形成气液两相混合流,经过管流后从旋流段切向入口射入柱体内部,在柱体断面分散上浮。PIV 测量系统设备如图 3 所示,通过 PIV 测量分析得到了气泡速度矢量图(图 4)。试验工况见表 1。

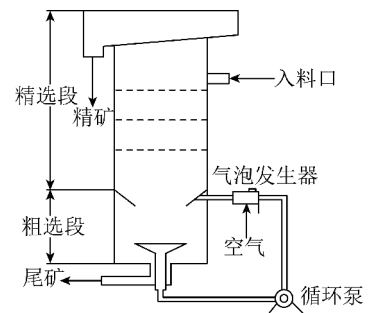
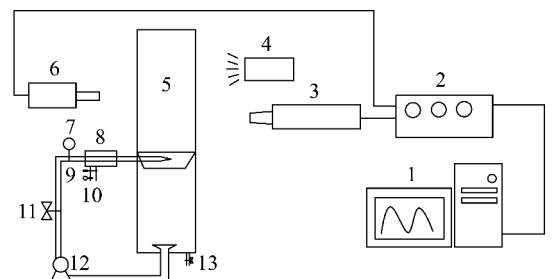


图 2 旋流微泡浮选柱结构

Fig. 2 Chart of cyclone micro-bubble flotation column



1—计算机; 2—同步控制器; 3—激光发生器; 4—光源; 5—玻璃浮选柱; 6—CCD相机; 7—电磁流量计; 8—气泡发生器; 9—气体流量控制阀; 10—气体流量计; 11—液体流量控制阀; 12—循环泵; 13—排水阀

图 3 PIV 测量系统设备

Fig. 3 PIV measuring system equipment

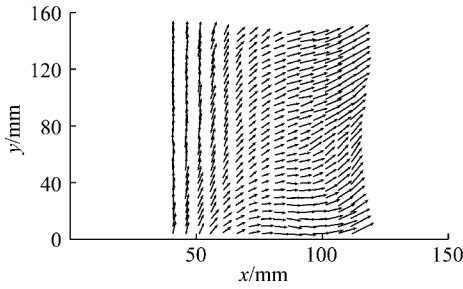


图4 PIV 拍摄在气泡单相流中测得的速度矢量图

Fig. 4 Velocity vector of bubble in the bubble single-phase flow diagram with PIV

表1 PIV 系统试验测量工况

Table 1 Experiment condition of PIV

测量区域	测量工况	测量数据	测量流场
柱选段	循环水量 1.5 m ³ /h 充气量 0.15 L/min	坐标 x, y, z 速度分量 v_x, v_y	气泡 单相流

图4以矢量图形式直观显示了试验所测量的平面,即柱式分选段的PIV测量结果,箭头表示气泡在此平面上的速度投影。由图4可知,在既定的工况下,柱选段中心区域的气泡近似于水平运动,在靠近壁面区域是轴向运动。三维空间中,气泡在靠近轴心区域主要是旋转运动,轴向运动较低,靠近壁面区域的气泡切向运动较低,轴向运动较强。而中心区域的气泡量向近似45°方向运动,是由于锥段旋流的影响,在中心轴线形成的气柱造成。测量结果与试验现象一致。

3.2 高速动态显微测量技术应用情况

高速动态显微摄像技术应用广泛,任浏祎^[27]通

过高速摄像技术探明了使不同粒级的锡石浮选回收率达到最佳时颗粒-气泡间的最佳匹配范围。统计分析了气泡量、气泡大小对浮选效果的影响,从微观角度分析了颗粒-气泡间的相互作用力对浮选的影响。Verrelli等^[28]通过高速动态显微摄像技术研究浮选中气泡与颗粒的相互作用的过程,得到颗粒黏附的动力学因素与界面化学因素之间的关系。曾荣等^[29]利用高速摄像技术对采集到的数据进行浮选泡沫图像分析,计算出泡沫颜色参数、气泡个数和大小、泡沫的稳定度和移动速度等泡沫物理参数。

笔者以高速动态显微摄像技术在实验室中拍摄气泡运动轨迹,设备结构如图5所示。通过循环泵使柱体里事先注入的清水进行闭路循环,由自动注射泵匀速注入空气,气泡在液体流场中旋转上升至液面,利用高速动态显微摄像机捕捉气泡上升运动的过程,得到气泡单体的运动轨迹或大小。同时得到颗粒单体以及颗粒与气泡碰撞两者相互作用的运动轨迹。试验工况见表2。

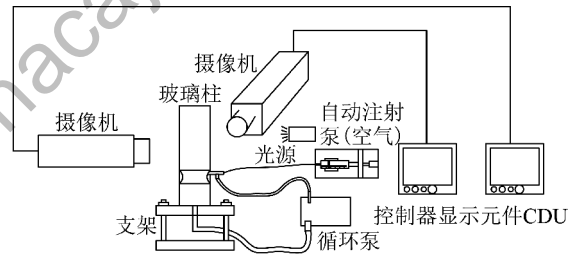


图5 高速动态显微摄像机拍摄气泡设备结构

Fig. 5 Device structure of shooting bubble by high-speed dynamic microscopic camera

表2 试验测量工况

Table 2 Experiment condition

测量区域	测量工艺参数	测量数据	测量系统	测量流场
小型浮选柱 柱选段	循环水量:1.5 L/min 充气量:0.01 L/min 工作帧数:1 000 曝光时间:500 μs	坐标 x, y, z	高速动态显微测量系统(微距镜头)	气泡单相流
气泡出口	气泡粒径:1.7 mm 玻璃微珠粒径:130 μm 工作帧数:500 曝光时间:750 μs	滑移时间	高速动态显微测量系统(显微镜头)	气泡、颗粒

将拍摄的一组视频由内存卡读到电脑上,用i-SPEED Suite软件将视频格式转化为图片格式,然后用Image-pro Plus软件对图片进行处理。气泡运

动轨迹如图6所示。图中线性轨迹代表了气泡在流场中旋转上升的轨迹,通过观察气泡的运动轨迹,可以了解到流场的运动状况,图中是一个平面上的运

动轨迹,利用2台高速动态显微摄像机可以得到气泡运动的三维轨迹,同时通过软件得到气泡上升过程中的速度、面积、坐标等信息,利用此系统还可测量气泡与颗粒碰撞前后的三维运动轨迹。



图6 高速动态显微摄像机拍摄气泡在不同时刻的位置

Fig. 6 Bubbles position at different times by high-speed dynamic microscopic camera

颗粒气泡碰撞黏附滑动如图7所示。利用高速动态显微摄像机拍摄气泡、携带颗粒气泡与颗粒碰撞图像,可以清晰地观测到气泡的矿化过程,气泡和颗粒发生碰撞后,黏附在气泡表面,沿气泡表面滑至气泡底端再随气泡上浮。因颗粒向气泡运动靠近以及气泡液膜破裂的时间非常短暂,以毫秒为数量级,通过摄像机可以连续记录颗粒与气泡相互作用的瞬间过程。同时通过这个平台还可以研究不同的药剂、流体环境对气泡矿化的影响机理。

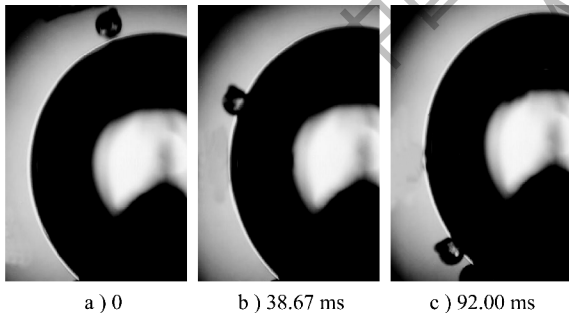


图7 表面不规则颗粒在气泡表面的滑动

Fig. 7 Sliding schematic diagram of irregular particles in bubble surface

4 展 望

1) PIV技术在复杂流态、气固液三相流动测量方面的精确性、稳定性、准确性问题。尤其选矿中,多数设备涉及到气、固、液三相,且流态涉及强旋流以及多种流态的复合,固相和气相具有较高的浓度。如何使得PIV测量结果能真正代表选矿过程实际流动过程,如何与数值技术更好地结合,表征一个客

观的选矿过程是今后技术发展的重点。

2) PIV测量流体微环境方面。矿化反应微观上是气泡和颗粒作用的过程,颗粒运动受限于气泡周围的微流体环境,微流体测量比宏观尺度的流动测量更具挑战性。

3) 高速动态显微摄像技术应用于界面尺度行为的测量。高速动态显微摄像技术主要实现对颗粒、气泡运动的轨迹、动态行为测量,在尺度更小的界面行为方面也可以实现精准测量,如在研究水化膜的破裂、减薄方面,测量结果和界面物理化学相结合,将有助于研究水平向微观尺度甚至纳观尺度迈进。

5 结 语

PIV可以实现浮选过程中宏观流态和微观流态的测量,并以速度矢量、流线等形式直观表征。本文以实验室旋流-静态微泡浮选柱为例,使用PIV技术测量了低充气量下柱体内部特征截面,获得了气泡单相流的速度矢量图,通过对流场的分析可以探明浮选设备内部流动特征及流动缺陷,指导设备运行调控,提出设备优化设计方法。高速动态显微摄像测量技术可以实现浮选流场中对气泡、颗粒的三维运动轨迹跟踪,及气泡矿化过程的微观拍摄,为浮选过程颗粒、气泡运动规律的研究和微观矿化机理研究提供了很好的研究渠道。本文以实验室拍摄气泡运动轨迹为例,测量了气泡单体的运动轨迹及气泡和颗粒的碰撞黏附,获得了气泡单体的运动轨迹图,以及气泡和颗粒的碰撞黏附影像图,通过后后期图像处理技术可以对其运动过程进行量化研究,寻求强化颗粒、气泡运动及矿化作用的方法。

参考文献(References):

- [1] 许灿辉. 矿物浮选气泡速度和尺寸分布特征提取方法与应用[D]. 长沙:中南大学,2011.
- [2] 刘殿文,张文彬. 浮选柱研究及其应用新进展[J]. 国外金属矿选矿,2002,39(6):14-17.
Liu Dianwen,Zhang Wenbin. The research progress and application of new flotation column[J]. Metallic Ore Dressing Abroad,2002,39(6):14-17.
- [3] 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.
- [4] 张敏. 柱浮选充填及流体动力学研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2007.
- [5] Abdullah B,Dave C,Nguyen T H,et al. Electrical resistance tomography-assisted analysis of dispersed phase hold-up in a gas-in-

- ducing mechanically stirred vessel[J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(22): 5648-5662.
- [6] 韩玉环, 靳海波. 采用电阻层成像技术测量气液(固)鼓泡床相含率的分布特性[D]. 北京: 北京化工大学, 2009.
- [7] 徐玉明, 迟卫, 莫立新. PIV 测试技术及其应用[J]. *舰船科学技术*, 2007, 29(3): 101-105.
Xu Yuming, Chi Wei, Mo Lixin. PIV measurement technique and its application[J]. *Ship Science & Technology*, 2007, 29(3): 101-105.
- [8] 王浩, 曾理江. 二维及三维流场的测量方法[J]. *光学技术*, 2001, 27(2): 139-142.
Wang Hao, Zeng Lijiang. Optical methods for measuring 2D and 3D flow field[J]. *Optical Technology*, 2001, 27(2): 139-142.
- [9] 张东东, 许宏庆, 何枫. 气固两相射流瞬时速度场和浓度场的 PIV 研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2003, 43(11): 1491-1494.
Zhang Dongdong, Xu Hongqing, He Feng. Particle imaging velocimetry of instantaneous velocity and concentration distributions in gas-solid two-phase jet flows[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2003, 43(11): 1491-1494.
- [10] 孙鹤泉, 康海贵, 李广伟. PIV 的原理与应用[J]. *水道港口*, 2002, 23(1): 42-45.
Sun Hequan, Kang Haigui, Li Guangwei. Theory and application of PIV[J]. *Journal of Waterway & Harbor*, 2002, 23(1): 42-45.
- [11] 闫小康. 柱式浮选的多流态过程模拟及其流体动力学研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- [12] 刘灵芝. 摄像机中成像器件的工作原理(上): 固态传感器的像素结构及信号传输方式[J]. *影视技术*, 2005(5): 38-44.
Liu Lingzhi. The working principle of the imaging device in the camera (one)-solid state sensor pixel structure and signal transmission mode[J]. *Motion Picture & Video Technology*, 2005(5): 38-44.
- [13] 刘灵芝. 摄像机中成像器件的工作原理(下): 固态传感器的像素结构及信号传输方式[J]. *影视技术*, 2005(6): 46-49.
Liu Lingzhi. The working principle of the imaging device in the camera (two)-solid state sensor pixel structure and signal transmission mode[J]. *Motion Picture & Video Technology*, 2005(6): 46-49.
- [14] 罗玮, 周孝德, 程文, 等. PIV 应用于气液两相流的研究现状[J]. *传感器与微系统*, 2006, 25(2): 1-3.
Luo Wei, Zhou Xiaode, Cheng Wen, et al. Research advances of PIV in gas-liquid phase flow[J]. *Transducer & Microsystem Technologies*, 2006, 25(2): 1-3.
- [15] Keller J, Möller G, Boes R M. PIV measurements of air-core intake vortices[J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2014, 40(9): 74-81.
- [16] Zhang D, Deen N G, Kuipers J A M. Numerical simulation of the dynamic flow behavior in a bubble column: a study of closures for turbulence and interface forces[J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(23): 7593-7608.
- [17] Pfleger D, Becker S. Modelling and simulation of the dynamic flow behaviour in a bubble column[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(4): 1737-1747.
- [18] Ranade V V, Tayalia Y. Modelling of fluid dynamics and mixing in shallow bubble column reactors: influence of sparger design[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(4): 1667-1675.
- [19] Stefano Bove, Hjertager Bjørn H. Numerical aspects of bubble column simulations[J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2004, 2(1): 21-30.
- [20] 石惠娴, 王勤辉, 骆仲浚, 等. PIV 应用于气固多相流动的研究现状[J]. *动力工程学报*, 2002, 22(1): 1589-1593.
Shi Huixian, Wang Qinhui, Luo Zhongyang, et al. The application of PIV in gas-solid multiphase flow[J]. *Power Engineering*, 2002, 22(1): 1589-1593.
- [21] 许联锋, 陈刚, 李建中, 等. 气液两相流中气泡运动速度场的 PIV 分析与研究[J]. *实验力学*, 2002, 17(4): 458-463.
Xu Lianfeng, Cheng Gang, Li Jianzhong, et al. PIV measurement for bubble velocity in gas-liquid two-phase flow[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2002, 17(4): 458-463.
- [22] 李楠, 谢刚, 施哲, 等. 基于激光 PIV 技术的 XFD 浮选机流场特征分析[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(3): 586-591.
Li Nan, Xie Gang, Shi Zhe, et al. Flow field features analysis of XFD floatation machine based on PIV technique[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2015, 26(3): 586-591.
- [23] 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.
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.
- [24] 黄亚飞. 应用 PIV 技术对上升流水力分选机流场的试验研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2009.
- [25] 闫小康, 刘炯天, 周长春. 旋流-静态浮选柱管流段的两相流数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(3): 506-510.
Yan Xiaokang, Liu Jiongtian, Zhou Changchun. Two-phase numerical simulation on the pipe flow unit of cyclonic-static micro bubble flotation column[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(3): 506-510.
- [26] Wang A, Yan X, Wang L, et al. Effect of cone angles on single-phase flow of a laboratory cyclonic-static micro-bubble flotation column: PIV measurement and CFD simulations[J]. *Separation & Purification Technology*, 2015, 149(7): 308-314.
- [27] 任沛彬. 细粒锡石颗粒-气泡间相互作用及其对浮选的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [28] Verrelli D I, Koh P T L, Nguyen A V. Particle-bubble interaction and attachment in flotation[J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(23): 5910-5921.
- [29] 曾荣, 沃国经. 图像处理技术在镍选厂中的应用[J]. *矿冶*, 2002, 11(1): 37-41.
Zeng Rong, Wo Guojing. Application of the image processing technology in nickel concentrator[J]. *Mining & Metallurgy*, 2002, 11(1): 37-41.