



移动扫码阅读

李锐,熊杰.基于光学探针的煤层气气泡形态井下实时探测装置[J].煤炭科学技术,2019,47(12):250-254.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.12.036

LI Rui,XIONG Jie.Real-time CBM bubble detection device based on optical probe[J].Coal Science and Technology,2019,47(12):250-254.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.12.036

基于光学探针的煤层气气泡形态井下实时探测装置

李锐,熊杰

(长江大学 电子信息学院,湖北 荆州 434023)

摘要:针对目前常用的气泡探测装置不能满足煤层气井环空内气泡实时检测要求的问题,设计了一种基于光学探针的煤层气气泡形态井下实时探测装置。该装置以微处理器 STM32 为核心,利用光在空气与溶液中折射率的不同,获得表征不同介质的高低电平信号,计算煤层气气泡形态相关参数。该装置克服了以往气泡探测装置的不足,不论在目标检测的针对性还是速度方面,均能满足煤层气井环空内气泡实时检测的要求,有利于充分认识煤层气井下液体参数变化特征和研究气藏及井筒气液两相流动规律。探测装置模拟试验结果表明,该探测装置速度响应快、计算精度高,能满足实际项目工程需求。

关键词:气液二相流;光纤探针;煤层气;探测装置

中图分类号:TD712;TD67

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)12-0250-05

Real-time CBM bubble detection device based on optical probe

LI Rui,XIONG Jie

(Electronics & Information School,Yangtze University,Jingzhou 434023,China)

Abstract: According to the current problem that bubble detection device commonly used in CBM well cannot meet the requirements for real-time detection, a down hole real-time detection device for CBM bubble is designed based on optical probe to solve this problem. The core processing component of this device is microprocessor STM32. As the refractive index of light in the air and liquor are different, this device can generate high level or low level signals representing different mediums, then calculate relevant parameters of gas bubble from CBM. This device overcomes shortcomings of conventional bubble detection devices. In terms of both target pertinence and speed of detection, it meets requirements of real-time detection of gas bubbles in CBM wells, and can be used to fully understand characteristics of fluid parameters variation and gas-liquid two-phase in reservoir and wellbore. The simulation test results of detection device show that detection device has fast response speed and high calculation accuracy, and can meet the engineering requirements of actual project.

Key words: gas-water two-phase fluid; optical probe; CBM; detection device

0 引言

由于受到煤层气成藏地质条件的影响,在煤层气井生产的排水降压过程中煤层气和地下水共同从井筒产出,于是在井筒环空内便产生了气液两相流^[1]。由于受到煤层气开采技术条件的限制,在现阶段监测并控制井筒环空内气液两相流工作情况是实现煤层气开采管理的有效途径^[2]。

国内外学者对煤层气井中气液两相流的问题进行了相关研究,设计了相关的气泡检测装置。文献

[3-4]设计了基于光散射成像原理的气泡探测装置,它通过将激光束照射入水体,入射光线遇到不同形态的气泡时将会在不同方向产生光强度不同的散射,利用 CCD 照相机对不同方向上散射光成像,再利用计算机进行图像处理与计算后便可得到气泡的速度、体积和局部气含率等情况。文献[5-6]设计了基于超声波衰减原理的气泡探测装置,由于超声波信号通过不同介质时超声波信号的衰减量不同,根据超声波的这一特性再结合气泡与液体具有不同的阻抗,在水槽一侧利用超声波发射器发送具有一

收稿日期:2019-06-04;责任编辑:赵 瑞

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61273179)

作者简介:李 锐(1982—),男,湖北天门人,博士研究生。E-mail:94303052@qq.com

定频率和功率的超声波信号,在水槽另一侧通过超声波接收器接收该超声信号,然后通过软件分析超声波信号的衰减参数,从而得到气泡速度和体积等信息。这 2 种类型的气泡测量装置均可对气泡的基本形态进行检测,但都具有应用的局限性,均只适合气泡形态的地表检测,不适合煤层气开采井中井底气泡形态的检测。

在煤层气井井筒中进行实时气泡形态检测是研究煤层气井中气液两相流规律最直接的方式。鉴于此,文献[7-10]设计了基于电导率的煤层气气泡形态井下实时探测装置,它是根据气体电导率为 0,而溶液电导率不为 0 这一特点,通过检测气体和溶液 2 种介质电导率的明显差异来测量气泡的相关参数,该装置能在煤层气井井筒中完成气泡形态参数的实时检测,具有一定的准确性。但该装置在煤层气井筒中工作时,采用直流电源供电,气液两相流中的液体容易腐蚀电极,影响测量结果,导致精度下降;另一方面测量电极采用导电材料,易受润湿性的影响,导致气泡速度测量不准确。为了克服利用电导率进行煤层气井下气泡形态检测过程中存在的不足,设计了基于光学探针的煤层气气泡形态井下实时探测装置。

1 光学探针工作原理及设计

1.1 光学探针工作原理

液相的折射率约为 1.35,气相的折射率约为 1,由于光在折射率不同的气相和液相中发生全反射的程度不同,根据这一原理设计了光学探针传感器^[11-12],如图 1 所示。

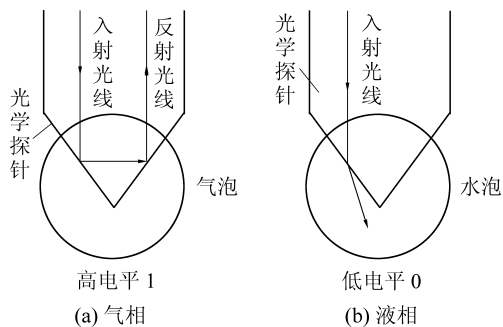


图 1 光学探针工作原理

Fig. 1 Optical probe working principle

当光学探针探头与水相接触时,由于该介质的折射率较大,不会在探头处发生全反射,在出射端检测到较小的光功率,输出近似为低电平;当光学探针探头与气相接触时,由于该介质的折射率较小,将在探头处发生全反射,在出射端检测到较大的光功率,输出近似为高电平。因此,可由出射光高低电平的

信号来判断所接触介质为液相或气相。

1.2 光学探针设计

光学探针传感器主要由发射光产生电路、敏感探头、出射光检测电路 3 个部分组成。发射光产生电路用于产生 400~600 nm 波长的可见光,设计中采用高亮发光二极管产生可见光通过输入光纤传送至敏感探头。出射光检测电路用于检测出射光纤反射回来的可见光,通过光电二极管实现光电转换,采用仪表放大器对表征光强的电压信号进行放大^[13-14]。敏感探头对气泡形态检测的精度十分重要,装置中选取蓝宝石材质,可有效减小液体润湿性对敏感探头的影响,其直径为 400 μm ,探头顶端夹角为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 。光学探针传感器结构框图如图 2 所示。

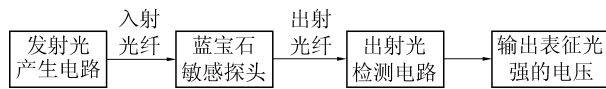


图 2 光学探针传感器结构框图

Fig. 2 Structure diagram of optical probe sensor

2 基于光学探针的气泡探测装置工作原理

基于光学探针的气泡探测装置采用测量在液相和气相中返回光强信号不同的原理进行煤层气开采井井筒环空中气泡的体积与速度检测。测试装置原理如图 3 所示,利用自制的光学探针传感器进行气泡体积与速度测量。其中,装置安装短接与油管相连,并且在安装短接周向均匀分布 8 个光学探针传感器组,用以组成光学探针阵列,以提高气泡形态参数检测的精度。

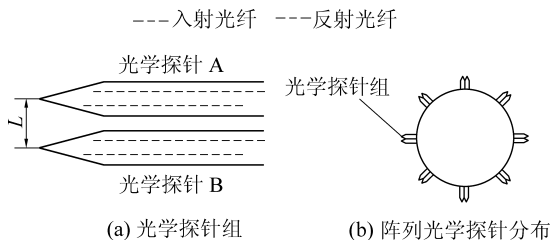


图 3 探测装置原理

Fig. 3 Detection device schematic

将组成光学探针组的 2 个光学探针 A 和 B 安装在套筒内,通过套筒与油管连接,其中选用不锈钢作为套筒材质。在安装时,需要将 2 个光学探针的入射光纤端面和反射光纤端面靠近在一起,并且这 2 个光学探针的蓝宝石敏感探头的距离相差 L 。

当敏感探头接触到液相时,反射光纤返回表征较小光强度的电压,以低电平表示;当敏感探头接触到气相时,反射光纤返回表征较大光强度的电压,以

高电平表示。基于此原理,利用光学探针实现气泡相关参数检测。

2.1 气泡速度检测

光学探针 A 和 B 协同工作时,可完成气泡速度的检测。如图 3 所示,以光学探针 B 的探头顶点为起点,当光学探针 B 的敏感探头接触到气泡时记为时间 t_0 ,此时对应的处理电路输出高电平;在气泡持续上升的过程中,处理电路持续输出高电平;以光学探针 A 的探头顶点为终点,当光学探针 A 的敏感探头接触到气泡时记为时间 t_1 ,对应的处理电路输出高电平;一段时间后,光学探针 B 的探头将检测到液体记为时间 t_2 ,此时 B 探针对应的处理电路输出低电平。当气泡超出光学探针 A 的检测范围时,装置输出低电平,此时记为时间 t_3 。在此过程中,两根探头顶点间的距离为 L 。光学探针 A、B 测量气泡速度理论工作波形如图 4 所示。

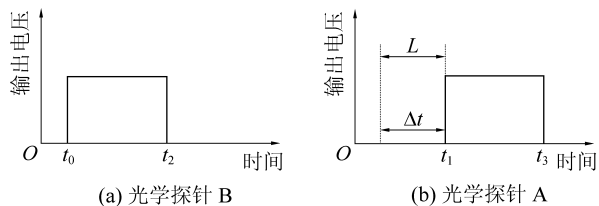


图 4 测量气泡速度理论工作波形

Fig. 4 Measurement of bubble velocity theory work waveform

由工作波形分析可知,气泡在上升过程中,上升 L 的距离耗时记为 Δt ,故可求得气泡理论上升速度为

$$V = L / \Delta t = L / (t_1 - t_0) \quad (1)$$

2.2 气泡体积检测

利用单个光学探针的输出数据即可进行气泡体积的检测,以光学探针 A 的输出数据为例,当气泡在上升过程中接触到光学探针 A 的敏感探头时,光学探针 A 的处理电路输出高电平,对应的时间为 t_1 ;气泡继续上升,当敏感探头不能完全接触到气泡时,返回光强信号很小,光学探针 A 的处理电路输出低电平,对应的时间为 t_3 。由图 4 可知,单个气泡上升时间 $t_4 = t_3 - t_1$,利用 STM32 微处理器的捕获功能,在上升沿(t_1 时刻)开始捕获,在下降沿(t_3 时刻)结束捕获,通过 STM32 微处理器自动计算出 t_4 的值。则气泡直径 $D = V t_4$,其中 t_4 为单个气泡被光学探针检测到的时间,假设气泡为球形,则气泡体积 S 可表示为

$$S = 4\pi r^3 / 3 \quad (2)$$

其中, r 为气泡的半径, $r = D/2$ 。

2.3 参数 L 的确定

在光学探针组的设计制作过程中,图 3 所示的光学探针 A 敏感探头顶部和光学探针 B 敏感探头

顶部的距离 L 对气泡速度与体积的检测起着至关重要的作用。

CHABOTJ 等^[15]对 L 分别取 10.3、9.5、4.5、2.0、1.0 mm 时的情况进行了试验与分析,结果发现当 L 取 10.3、9.5、4.5 mm 时,容易出现多个气泡同时通过该区间,从而导致速度检测数据测量错误;当 L 取 1.0 mm 时,气泡通过光学探针 A、B 的时间间隔过小,由于信号上叠加噪声的影响导致时间间隔测量误差偏大。当 L 取 2.0 mm 时,可以较好地获取光纤探针 A、B 的反馈波形,试验结果准确。结合大量试验数据和文献资料,本文选取 $L = 2$ mm。

3 试验

3.1 试验装置结构

煤层气气泡形态井下实时探测模拟装置如图 5 所示,由气泵产生试验所需气泡,经管道接入流量调节阀,利用流量调节阀对气泡的大小和速度进行调节,调节后的气泡通过管道进入煤层气井筒环空模拟装置中。通过光学探针阵列检测上升中的气泡,利用 STM32 微处理器捕获气泡通过探针的时间,经滤波、去噪、运算处理后,将结果传送到 PC 机,最终在 PC 上实现气泡速度和体积参数显示。

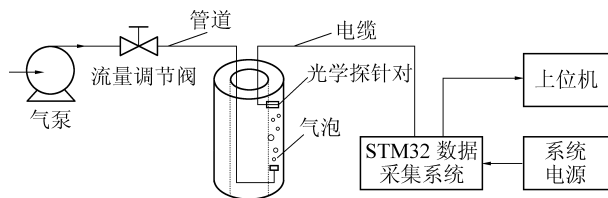


图 5 煤层气气泡形态井下实时探测模拟装置

Fig. 5 Real-time detection and simulation device of CBM bubble morphology in underground mine

3.2 试验步骤

在模拟煤层气井筒环空工况时,液体选用温度为 25 ℃ 的清水,具体试验步骤如下:

- 1) 接通气泵工作电源,调节流量调节阀,获取不同速度和体积的气泡。
- 2) 接通系统电源,使得 STM32 数据采集系统和光学探针传感器正常工作。
- 3) 利用多相流测试系统中的标准气泡参数采集装置对气泡运行状态进行拍照,结合图像处理算法对气泡运行状态进行处理后获取气泡的标准体积与速度。
- 4) 将本装置测量的气泡相关参数与多相流测试系统获取的气泡标准数据进行比对分析,得出误差。

3.3 试验结果分析

3.3.1 单光学探针输出数据分析

单光学探针输出信号经过信号调理与滤波处理后的典型波形如图 6 所示。在气泡具有相同速度时,如果气泡偏小,光学探针输出信号的高电平时间短;如果气泡偏大,光学探针输出信号的高电平时间长。幅值与光学探针输出的光强值成正比关系,其值为经信号滤波、仪表放大和 AD 采集后得到的电压。通过图 6 观察发现,当没有气泡通过时,检测装置输出信号幅值为 0;当有气泡通过时,检测装置输出信号幅值不为 0,这种幅值的明显变化在气泡的不同运动方式中均可清楚观察到,从而表明利用光学探针监测不同介质的反射情况进行气相与液相的区分是有效的。

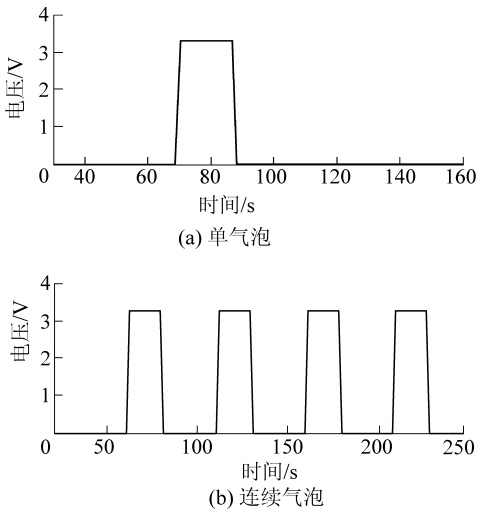


图 6 单光学探针试验结果曲线

Fig. 6 Experimental results curve of single optical probe

3.3.2 双光学探针输出数据分析

当气泡速度为 0.261 m/s, 体积为 113.81 mm³ 时所获得的双光学探针试验结果如图 7 所示。从图 7 观察得出,对于相同的连续气泡,光学探针 B 比光学探针 A 先检测到气泡,考查连续气泡中的单个气泡发现,针对同一单个气泡由 A、B 光学探针的横坐标时间差可获取 t_0 和 t_1 的值,利用式(1)、式(2)即可计算出单个气泡的体积和速度,从而有效说明了所设计的光学探针可进行气泡体积与速度的测量。

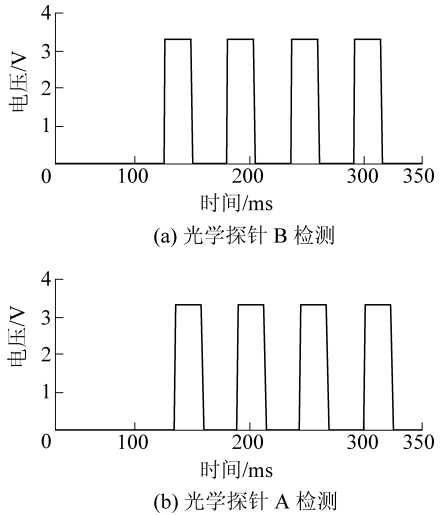


图 7 双光学探针试验结果曲线

Fig. 7 Experimental results curve of dual optical probe

将在煤层气井环空模拟装置中利用本装置采集到的气泡速度、体积参数,与利用多相流标准气泡参数采集装置采集到的气泡速度、体积参数进行对比(主要讨论不同体积的气泡在速度变化不大情况下),部分试验数据见表 1。

表 1 光学探针和标准气泡参数采集装置试验数据对比

Table 1 Test datas comparision between optical probe and standard bubble parameter acquisition device

光学探针采集数据		标准气泡参数采集装置采集数据		误差/%	
速度/(m·s ⁻¹)	体积/mm ³	速度/(m·s ⁻¹)	体积/mm ³	速度	体积
0.159	4.192	0.161	3.932	1.24	6.61
0.229	33.538	0.234	35.265	2.14	4.90
0.261	113.831	0.267	119.138	2.25	4.45
0.273	268.358	0.278	256.366	1.80	4.68
0.294	523.526	0.299	497.898	1.67	5.15
0.283	905.932	0.286	936.995	1.05	3.32
0.299	1437.615	0.311	1339.974	3.86	7.28

当标准气泡参数采集气泡速度为 0.311 m/s, 体积为 1 339.974 时,光学探针采集测量得出的速度与体积误差偏大,主要是因为气泡体积偏大时,其气泡直径偏大,表征为气泡通过光学探针时光学探针输出波形的高电平时间偏长,从而测得的气泡速度偏小(光学探针距离 L 一定),从而速度误差增大。通

过分析得出,基于光学探针的煤层气气泡形态井下实时探测装置测量气泡速度误差在 $\pm 4\%$ 以内,测量气泡体积误差在 $\pm 8\%$ 以内。体积误差大于速度误差,因为体积测量是根据速度参数由式(2)计算得出,速度误差的累积导致体积误差偏大。气泡体积增大时,通过光学探针测量区域的时间相对变短,影

响速度测量精度导致误差增大。

4 结 论

基于光学探针的煤层气气泡形态井下实时探测装置以微处理器 STM32 为核心,根据光在空气与溶液中折射率的不同,获得表征不同介质的高低电平信号。利用气泡通过光学探针组时产生具有时间差的一对高电平信号,结合已确定的光学探针组中敏感探头的距离,进行气泡速度的计算;气泡通过光学探针的敏感探头时,STM32 对检测到的高电平信号进行捕获,获取气泡通过敏感探头的时间,在确定气泡速度的基础上,从而计算出气泡的直径,进而求得气泡体积。基于光学探针的煤层气气泡形态井下实时探测装置与其他气泡测量装置相比,有如下特点:

1)传统的气泡测量装置主要应用于地表气泡形态参数检测,不适用于煤层气工况。本测量装置可在不足 30 mm 的煤层气井环空中作业,解决了煤层气井气泡实时检测的问题。

2)与基于电导率的煤层气气泡形态井下实时探测装置相比,本装置采用蓝宝石作为光学探针的敏感探头,有效克服了溶液润湿性的影响;光学探针不与溶液发生化学反应,不存在腐蚀探针的现象,有效避免了利用电导率测量气泡形态参数时腐蚀电极现象的发生,提高了装置气泡速度测量精度。

参考文献(References):

- [1] MENG Yanjun, TANG Dazhen, XU Hao, *et al.* Geological controls and coalbed methane production potential evaluation: a case study in Liulin area, eastern Ordos Basin, China [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 21(12): 95-111.
- [2] 周云龙, 张学清, 孙 斌. 应用电导探针技术识别气液两相流型方法及电导波动信号噪声的辨别 [J]. *传感技术学报*, 2008, 21(10): 1708-1712.
ZHOU Yunlong, ZHANG Xueqing, SUN Bin. Method for identifying gas/liquid two-phase flow patterns using conductance probes technique and noise recognition of conductance fluctuating signals [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(10): 1708-1712.
- [3] 王 磊. 基于光散射成像的气泡探测系统设计与实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [4] 罗晓斌, 朱定一, 乔 卫, 等. 高表面能固体的润湿性实验及表面张力计算 [J]. *材料科学与工程学报*, 2008, 26(6): 932-936.
LUO Xiaobin, ZHU Dingyi, QIAO Wei, *et al.* Wettability of high surface energy solid and its surface tension calculation [J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2008, 26(6): 932-936.
- [5] 尹浚羽, 蒋宏伟, 李 磊, 等. 井底气泡的形成过程及其平均初始直径计算 [J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(19): 30-33.
YIN Junyu, JIANG Hongwei, LI Lei, *et al.* Bubbles formation from

the bottom region of borehole and their initial average diameter calculation [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(19): 30-33.

- [6] CLARKSON C R, JORDAN C L, LIK D, *et al.* Rate-transient analysis of 2-phase (gas+water) CBM wells [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2012(8): 106-120.
- [7] 吴 川, 乌效鸣, 文国军, 等. 基于电导率的煤层气气泡形态井下实时探测装置 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40(9): 2137-2143.
WU Chuan, WU Xiaoming, WEN Guojun, *et al.* Real-time detection on CBM bubble based on electrical conductivity [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(9): 2137-2143.
- [8] JAHANBANI A, SHADIZADEH S R. Determination of inflow performance relationship by well testing [J]. *Society of Petroleum Engineers*, 2009, 56(6): 1-11.
- [9] ROTRAMEL J, BELL M. A pilot test of continuous bottom hole pressure monitoring for production optimization of coalbed methane in the Raton Basin [C]//SPE Production and Operations Symposium. Society of Petroleum Engineers, 2011.
- [10] 田道贵, 阎昌琪, 孙立成. 四传感器光纤探针测量气泡速度矢量模型 [J]. *化工学报*, 2013, 64(9): 3118-3122.
TIAN Daogui, YAN Changqi, SUN Licheng. Model of bubble velocity measurement using four-sensor optical fiber probe [J]. *CIESC Journal*, 2013, 64(9): 3118-3122.
- [11] 于莉娜, 杜胜雪, 李英伟, 等. 基于蓝宝石光纤探针的油气水三相流含气率测量方法 [J]. *测井技术*, 2014, 38(2): 140-143.
YU Lina, DU Shengxue, LI Yingwei, *et al.* Study on measurement method of gas holdup of oil-gas-water three phase flow based on sapphire optical fiber probe [J]. *Well Logging Technology*, 2014, 38(2): 140-143.
- [12] 杨 胜, 罗毓珊, 陈听宽, 等. 垂直上升管中采用光纤探针测量截面含气率的实验研究 [J]. *动力工程*, 2006, 26(6): 875-878.
YANG Sheng, LUO Yushan, CHENG Tingkuan, *et al.* Measurement of void fraction in vertically rising pipes by using optical fiber probes [J]. *Journal of Power Engineering*, 2006, 26(6): 875-878.
- [13] 牟海维, 王爱双, 张 坤, 等. 油气水三相流产出剖面光纤持气率计的设计与理论研究 [J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(14): 3363-3364.
MU Haiwei, WANG Aishuang, ZHANG Kun, *et al.* Design and theoretical research of an optical fiber gas holdup sensor for the oil-gas-water three-phase flow in production profile [J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(14): 3363-3364.
- [14] 郭涛涛, 孔令富, 张运生, 等. 基于光纤传感器的油气水三相流持气率测井仪 [J]. *电子技术*, 2010(2): 68-70.
GUO Xuetao, KONG Lingfu, ZHANG Yunsheng, *et al.* Logging equipment for void fraction of oil-gas-water three-phase flow based on optical fiber sensor [J]. *Electronic Technology*, 2010(2): 68-70.
- [15] CHABOT J, LEE S L P, SORIA A, *et al.* Interaction between bubbles and fiber optic probes in a bubble column [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1992, 70(2): 100-110.