

双探针电导探头测量气泡参数的信号质量

韩梅¹, 沙作良¹, 伍倩¹, 张念², 王铁峰², 王金福²

(1. 天津市海洋资源与化学重点实验室, 天津科技大学海洋科学与工程学院, 天津 300457; 2. 清华大学化学工程系, 北京 100084)

摘要: 制作了一种用于测量多相流气泡参数的双探针电导探头, 研究了探针参数、测试电路和采样方法对气泡信号质量的影响, 并提出了改进方法. 实验结果表明, 探针导通距离越小, 信号响应越快, 当导通距离小于 0.025 mm 时, 对信号响应影响不明显. 将探针电极与测试电路输入端的负极相连, 以保护探针电极, 避免其因电氧化腐蚀而减短使用寿命. 选取小阻值探针, 并根据其在液相中的阻值大小对外接限流电阻进行优化, 可实现采样电路的电阻匹配, 从而获得理想的信号响应幅值. 通过对所分析的各影响因素进行控制后, 得到了电压幅值变化达 3 V、噪音小且响应快的电导探针气泡信号.

关键词: 双探针电导探头; 信号响应; 信号幅值差; 信号噪音; 电氧化腐蚀

中图分类号: TQ016.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2009)02-0222-06

1 前言

探头法测量气泡参数是研究多相流反应器的重要测试技术. 典型探头技术有基于气液两相折光率不同的光纤探头法和基于两相电导率不同的电导探头法. 光纤探头信号响应快、质量较高, 但机械强度低, 且易受体系光学性质局限, 影响测量精度. 与光纤探针相比, 电导探针具有机械强度高的优点, 但存在信号响应慢、探针刺破气泡能力差、探针存在电氧化腐蚀问题等缺点. 许多研究者^[1-7]采用电导探头法对多相流体系中的气泡行为参数进行了研究. 孙科霞等^[8]通过将探针导通距离控制在 0.02 mm 以内, 减小了信号响应滞后问题, 获得了响应快的脉冲信号; 高正明等^[9]和杨健等^[10]提出在算法处理中应用概率统计方法能得到更可靠的气泡行为参数; Wu 等^[11]考虑到气泡侧向运动及探针间距对气泡丢失造成的影响, 引入校正因子改进了双探针电导探头法测量气泡行为. 然而, 关于双探针电导探头整个测试方法和影响信号质量的因素研究报道却很少.

本工作介绍了一种刺破气泡能力强、稳定性高、机械强度好的双探针电导探头的制作方法. 以实验测得的数据信号为基础, 结合电导测试理论, 从探针制作工艺、测试电路和采样方法三方面, 详细地分析了信号质量的影响因素, 并提出了改进信号质量的方法, 提高了测量气泡参数的可靠性和精度.

2 双探针电导探头

2.1 双探针电导探头的制作方法

双探针电导探头用经过特殊工艺加工过的 SKH 钢

针作为电极针, 表面镀有镍、金, 除顶端垂直高度 0.01~0.03 mm 的锥状部分裸露外, 其余表面均涂有去湿性较好的 Teflon 绝缘漆, 总直径为 0.15 mm. 首先将电极针经焊锡插入连有信号线的外径 0.3 mm 的铜管中, 保证两者连接牢固、导通良好, 制成电极. 再用环氧树脂将电极铜管表面绝缘、固化, 并保持平滑. 截取一小段 4 号注射针头, 套在涂有绝缘漆的电极针外部, 用环氧树脂固定后, 再插入 6 号注射针头内, 2 个不同型号的注射针头彼此导通, 但均与电极绝缘. 将上述两根电极并行插入管径为 2 mm 的不锈钢支撑管内, 调节探针垂直间距 H , 并保证两电极在同一水平面内, 用环氧树脂将不锈钢支撑管与注射针头的接口固封, 并保证两者导通. 最后取两根导线分别与信号线相连, 另取一导线与不锈钢管壁焊接相连, 制作完成后的双探针电导探头结构如图 1 所示, 电导探头的两探针彼此间互不导通, 将探头放入水中时, 每根探针均与不锈钢支撑管导通.

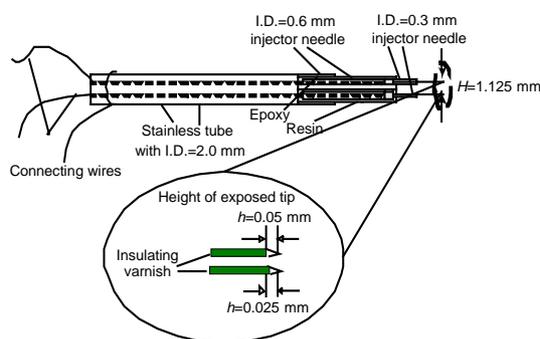


图 1 双探针电导探头结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of the dual-tip electrical conductivity probe

将 2 根探针与不锈钢支撑管接入测试电路, 形成 2 个独立的回路, 如图 2 所示. 当探针针尖处于气相中时, 回路断开, 产生高电压信号, 当采集板等效电阻足够大时, 高电压值 U_G 近似等于电源电压 U . 当探针针尖处于液相中时, 回路导通, 产生低电压值 U_L , 其大小与探针在液相中的电阻、外接限流电阻、AD 采样板等效电阻及电源电压有关. 探针在液相中的电阻受电极在液相中的间距和液相电导率的影响, 稳定条件下可将其等效为 R_p . 整个测试电路则满足 $U_L=R_p U/(R_p+R_0)$, 其中 R_p 为 AD 采样板与探针在液相中的等效电阻 R_p 的并联阻值, 即 $R_p=R_p R_b/(R_p+R_b)$, R_b 为 AD 采集板的等效电阻. 2 根探针交替处于气液两相中, 产生具有一定时间差的 2 列信号, 通过对信号进行算法变换和相关处理, 即可得一系列的气泡行为参数, 具体求解方法参见文献[12].

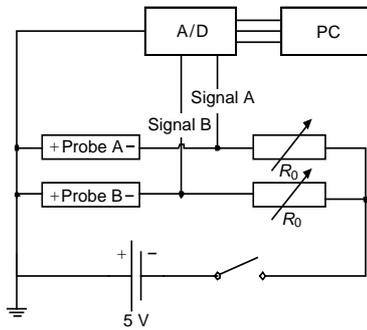


图 2 测试电路示意图
Fig.2 Schematic diagram of measurement circuit

2.2 自制双探针电导探头的优点

由于双探针电导探头测试法属于接触式测量, 为尽量减小探头对流场的干扰, 希望其尺寸尽量小. 但探头尺寸太小, 尤其在气液固三相体系中, 会使探头因受到流动冲击而来回晃动, 探针间距 H 的波动都会影响测量精度[13].

本工艺制作的双探针电导探头通过加入直径分别

为 0.4 和 0.6 mm 的注射针头, 解决了上述问题. 小直径的注射针头在大直径不锈钢支撑管的支撑下, 置于流场中, 减少了流场中的支撑管部分, 从而减小了对流场的干扰. 注射针头直接支撑探针, 可使探针裸露于流场的部分增大且减小流场造成探针的晃动, 提高了探针刺破气泡的能力和稳定性. 同时由于探针的机械强度增强, 可用于高固含率气液固体系气泡行为的测量.

2.3 探针导通距离

用电导探头进行测量时, 区分探针位于气相和液相只是探针顶端很小一段未涂绝缘漆的锥状导通部分, 定义该部分的垂直高度为探针导通距离 h , 如图 1 所示. 该参数对信号响应快慢有直接影响. 电导探针的信号响应滞后是普遍存在的问题, 这给气泡信号识别和尺寸判断等带来了较大误差. 孙科霞等[8]和吕术森等[14]认为信号响应滞后与探针要克服表面张力刺破气泡及与探针电极导通距离大小有关; Hibiki 等[15]提出气泡信号的前、后沿不陡峭是由于探针尺寸较大及探针刺破气泡时界面变形造成的; Shen 等[16]则认为探针的针尖结构、针尖携裹的液膜及界面变形都可能影响信号响应灵敏度, 但均没有对信号响应滞后作进一步的定量研究.

气泡信号响应滞后主要与电导电极的时间常数有关, 影响电导电极时间常数的因素包括流体力学因素、表面特性和探针电极结构[13]. 流动因素和表面特性的影响分别属于流体力学和材料学的考察范围, 本工作重点考察了导通距离的影响.

实验选用 2 根用上述工艺制作的双探针电导探头 P1 和 P2. 用光学显微镜测得 P1 两针导通距离均为 0.125 mm, P2 两针的导通距离分别为 0.05 和 0.025 mm. 在相同操作条件下, 分别用 P1 和 P2 进行采样, 其中用 P2 采样时, 将导通距离为 0.05 mm 的探针位于上游, 0.025 mm 的探针位于下游, 原始测试信号的局部放大如图 3 所示.

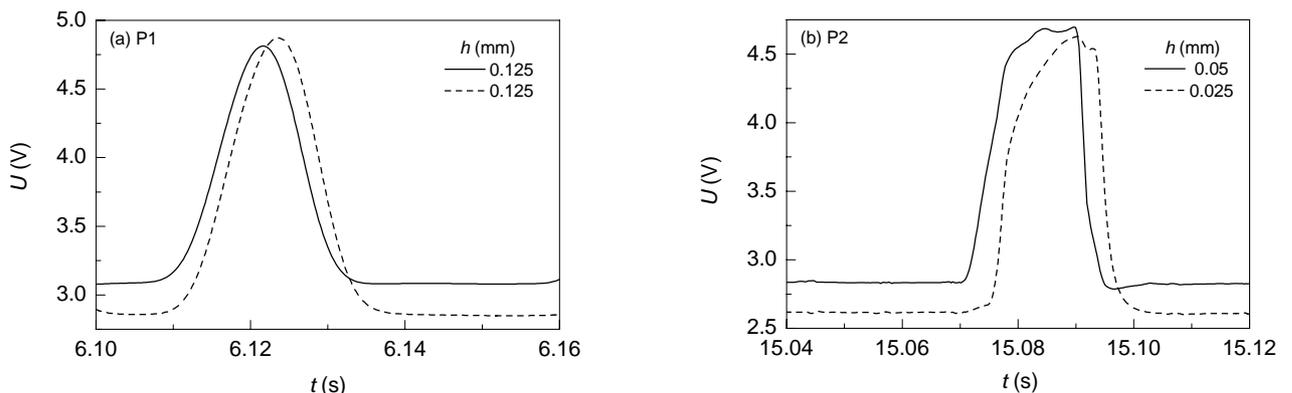


图 3 探针 P1 和 P2 测得的典型信号
Fig.3 The typical signals measured by probe P1 and P2

对比图3可以看出, 探头P1的测量信号存在明显的响应滞后现象, 波形近似呈三角形, P2两路信号的上升沿和下降沿相对于P1信号均更为陡峭, 接近方波, 说明探针导通距离对信号响应有重要影响, 导通距离越大, 信号响应滞后越显著. 图3(b)中P2的两路信号响应也略有差别, 导通距离0.05 mm的上游探针的信号响应略滞后于导通距离0.025 mm的下游探针, 但由于两针的导通距离都已经很小, 所以差别不显著. 可以认为当导通距离小于0.025 mm时, 探针导通距离的大小不再是影响信号响应滞后的主要因素, P2信号下降沿的陡峭程度也证实了这一点, 上升沿仍存在的响应滞后可能与探针绝缘层的去湿性有关.

3 测试电路的影响

3.1 电导探头与测试电路输入端的连接

双探针电导探头与测试电路输入端的连接方式对信号质量有重要影响, 是决定探头使用时间长短的关键. 当探针与测试电路输入端正极相接、不锈钢管与负极连接时, 探针在外加电压作用下极易失去电子, 并以金属

离子的形式进入溶液, 从而发生明显的电氧化腐蚀, 使针尖受损, 因此所测气泡信号质量很差, 如图4所示. 电氧化发生初始时, 探针锥状尖端开始变钝, 导通部分有暗黄色物质覆盖, 此时获得的原始信号如图4(a)所示, 出现了基线漂移现象, 低电压值在0.8~0.9 V之间波动, 高低电压差在1.2~2 V范围内变化. 探针使用30 min后, 探针尖端不再呈锥状, 且表面完全呈暗黄色, 同时原始信号出现明显的基线波动和脉冲信号消失, 如图4(b)所示. 此时探针已严重受损, 不能再用于气泡行为的研究.

目前解决电氧化腐蚀问题普遍采用交流电源方法, 即使电极极性周期性地交替转换. 本研究则采取直接将探针电极与测试电路输入端负极连接、不锈钢管与正极连接, 避免探针发生极化, 保护探针. 此外, 该方法也使整个测试电路更简化, 可直接采用直流电源, 无需接入电容器、电感线圈等, 使整个电路更容易控制调节. 本工作的测试即在直流电源下完成, 证实了该方法可完全消除探针的电氧化腐蚀现象, 经长时间使用并未发现探针损坏和信号质量变差等问题.

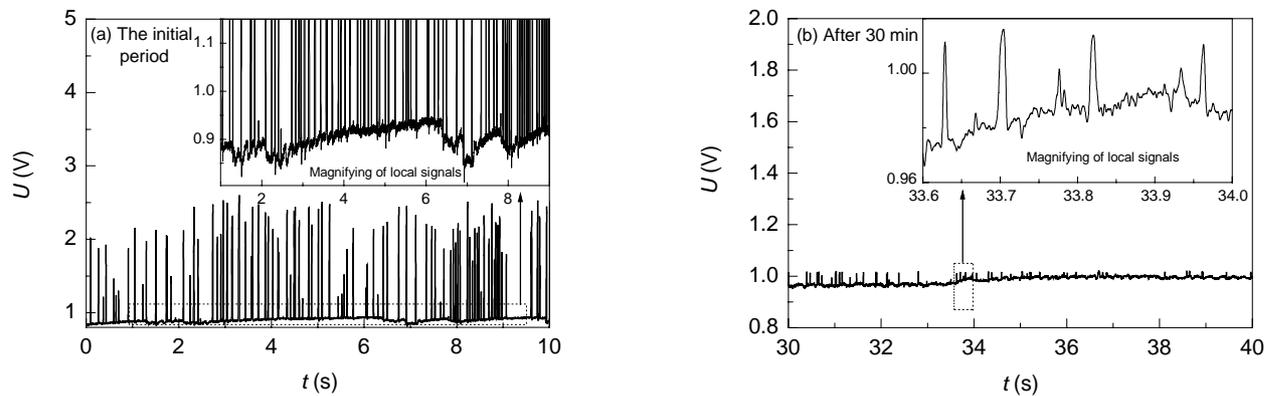


图4 初始阶段和探头使用30 min后测得的信号
Fig.4 The signals measured in the initial period and after 30 min

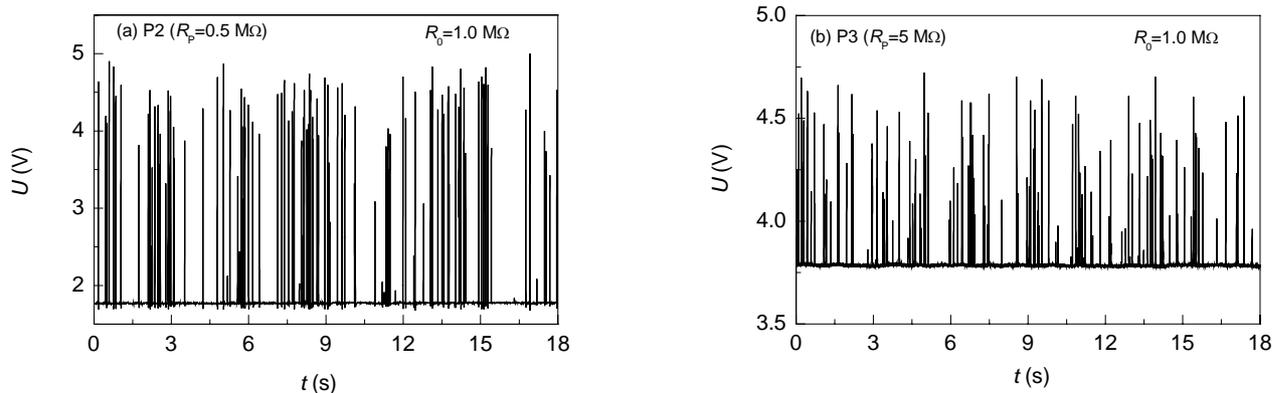


图5 电路优化后2根探针的测量信号
Fig.5 The signals measured by two probes at optimized circuit resistance

3.2 电阻匹配

3.2.1 探针的等效电阻

探针位于气液两相的高低电压差是衡量信号质量的一个关键指标,对确定气泡参数的准确性有重要影响.根据双探针电导探头的测试原理,高低电压差与探针在气相和液相中的电阻差直接相关.根据电路原理,测试电路的高低电压差与电阻值满足下列关系:

$$\Delta U = U_G - U_L = U - R_p U / (R_p' + R_0) = U [1 - R_p / (R_p' + R_0)], \quad (1)$$

其中, $R_p' = R_p R_b / (R_p + R_b)$, 当 AD 板等效电阻 R_b 远大于探针电阻 R_p 时, 式(1)可近似为

$$\Delta U = U_G - U_L = U [1 - R_p / (R_p + R_0)]. \quad (2)$$

实验选用 2 个在水中具有不同量级电阻值的双探针电导探头 P2 和 P3, 电阻分别约为 0.5 和 5 M Ω , AD 采样板的等效电阻约为 100 M Ω . 电阻约为 0.5 M Ω 的探头 P2 通过优化外接电路电阻, 可得到最大电压差为 3 V 的信号峰, 如图 5(a)所示, 此时外接电阻为 1 M Ω , 代入式(2)相对误差小于 8%. 对约为 5 M Ω 的 P3 进行外接电路电阻优化, 其所能获得的最大电压差小于 1 V, 如图 5(b), 此时外接限流电阻仍为 1 M Ω , 用式(2)计算相对误差小于 10%. 信号处理中, 一般要求高低电压差值

大于 1.2 V, 以减小非气泡信号的噪音影响. 因此, 在消除电氧化腐蚀的基础上, 要获得电压差较大的脉冲信号, 应首先选用较小电阻的探头. 电阻较大的探头则对采样 AD 板有较高的要求, 一般要使 AD 板的等效电阻比探针电阻高 2 个数量级以上. 另外, 也可以通过适当增大导通距离以减小探针电阻, 但一定程度上会牺牲信号的响应速度.

3.2.2 测试电路外接限流电阻

气泡信号的电压差还与测试电路外接限流电阻 R_0 有关. 根据双探针电导探头测试原理和电路理论, 当外接限流电阻太小时, 探针在液相中的低电压值会显著变大, 在气相中的电压值基本等于电源电压值, 即 U_G 大小基本等于电源电压, 而 U_L 显著变大, 则 $\Delta U = U_G - U_L$ 减小. 当外接限流电阻过大时, 由于探针本身电阻较小, 所以其在气相中的电压不再接近电源电压而显著降低, 液相电压减小不明显, 即 U_G 减小, 而 U_L 变化很小, 则 $\Delta U = U_G - U_L$ 也会减小. 对外接限流电阻选取进行了定量实验研究, 以便优化外接电路. 实验选用探针电阻为 0.5 M Ω 的探头 P2, 外接电阻分别选取 0.11, 0.61, 1.0 和 3.0 M Ω , 即探针电阻与外接限流电阻比分别为 5:1, 1:1, 1:2 和 1:6, 得到的气泡原始信号如图 6 所示.

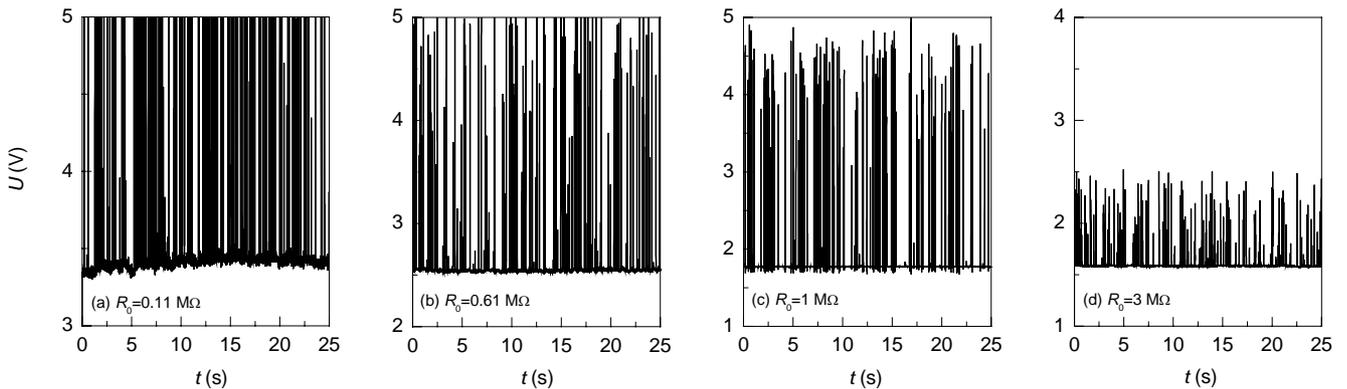


图 6 探针 P2(电阻 0.5 M Ω)在不同外接电阻下的气泡信号

Fig.6 The signals measured by probe P2 ($R_p=0.5 \text{ M}\Omega$) at different R_0

当探针电阻 R_p 与外接限流电阻 R_0 比为 5:1 时, 液相电压高, 气相电压为电源电压值, 得到了溢出信号, 如图 6(a)所示. 基于上述测试电路原理分析, 应增大外接限流电阻以减小探针两端的电压. 增大 R_0 , 使 R_p 与 R_0 比约为 1:1 时, 液相对应的电压减小, 气相对应的电压有所降低, 信号溢出程度较电阻比为 5:1 时减小; 而电阻比减小到 1:6 时, 得到了液相电压减小不显著、气相电压明显降低的气泡信号. 这 3 种条件下的气泡信号

均不能实现气泡相的有效识别. 当电阻比为 1:2 时, 获得了电压差大的原始信号, 故认为在选取外接限流电阻时, 电阻值约为探针电阻值 2 倍的外接电阻较为适宜.

4 数据采集方式

利用双探针电导探头测量气泡上升速度和气泡大小分布时, 要求两路信号有一定时间差且具有很好的相关性, 同时彼此互不干扰, 这对提高测量的准确性非常

重要。

实验选用导通距离分别为 0.025 和 0.05 mm、探针电阻 0.5 M Ω 的探头 P2, 在相同的操作条件下, 分别使用 1 块和 2 块北京双诺测控技术有限公司的 AC6010A 采集板对 2 路信号进行采样。实验发现, 数据采集方式对 2 路信号的独立性有较大的影响。当使用 1 块 AD 采集板同时对 2 路信号进行采样时, 2 路信号间存在明显

的相互干扰, 如图 7(a)所示, 与 AD 采集板的内部电路结构相关。而当用 2 块 AD 采集板分别对 2 路信号进行采样时, 信号间的相互干扰则基本消除, 见图 7(b)。因此, 对于普通的 AD 采集板, 为了获得相对独立且互不干扰的 2 路信号, 建议采用 2 块采集板分别对 2 路信号进行采集。

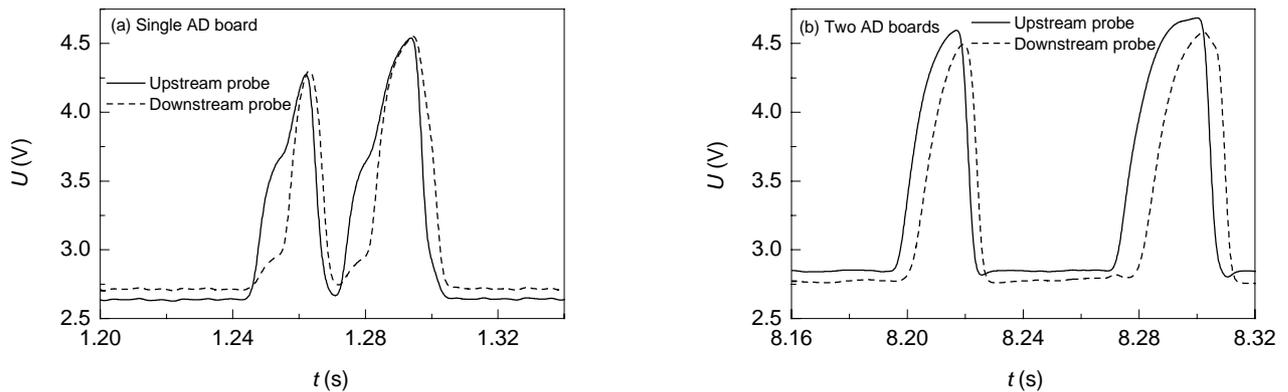


图7 单板和双板采集原始信号

Fig.7 The signals measured with a single AD board and two AD boards

5 结论

对影响双探针电导探头测量气泡信号质量的因素进行了研究, 并提出了改善探针测量信号质量的方法。主要结论如下:

(1) 通过改进水平双电导探针的制作工艺, 增强了探头探针刺破气泡的能力和探头的稳定性。

(2) 导通距离对气泡信号响应有重要影响, 导通距离越小, 信号响应灵敏性越高, 导通距离为 0.025 mm 的双电导探针获得了响应较灵敏的近方波信号。

(3) 探针与测试电路的连接方式对气泡信号质量有决定性的影响, 将探头的探针与电路正极相连时, 探针易发生电氧化腐蚀而损坏, 因此正确的连接方式为探头的探针与电路负极相连。

(4) 测试电路外接限流电阻的选取与信号质量密切相关, 应尽量选取电阻值较小的探头, 并对测试电路外接限流电阻进行优化, 以获得高低电压差较大的脉冲信号。实验用 0.5 M Ω 的探针, 在外接限流电阻与探针电阻比为 2:1 时, 获得了高低电压差达 3 V 的气泡信号。

(5) AD 采集板要与测试电路相匹配, 其等效电阻应比探针电阻大 2 个数量级以上。为获得相对独立、互不干扰的 2 路信号, 建议采用 2 块 AD 采集板进行信号数据采集。

符号表:

h	电导探针导通距离 (mm)
H	电导探针垂直间距 (mm)
R_0	外接电路限流电阻 (M Ω)
R_b	AD 采集板等效电阻 (M Ω)
R_p	电导探针在液相中的等效电阻 (M Ω)
R_p'	探针电阻与 AD 采集板等效电阻的并联总电阻 (M Ω)
U	电源电压 (V)
U_G	电导探针处于气相时电压值 (V)
U_L	电导探针处于液相时电压值 (V)
下标	
G	气体
L	液体

参考文献:

- [1] 杨建, 张鸣远, 苏玉亮, 等. 气液两相泡状流界面浓度的研究 [J]. 化学工程, 2002, 30(5): 34-37.
- [2] 曹长青, 刘明言, 王一平, 等. 液体黏度对气液固逆流三相湍动床动力学行为的影响 [J]. 化工学报, 2005, 56(4): 627-633.
- [3] Kataoka I, Ishii M, Serizawa A. Local Formulation and Measurements of Interfacial Area Concentration in Two-phase Flow [J]. Int. Multiphase Flow, 1986, 12(4): 505-529.
- [4] Kataoka I, Serizawa A. Interfacial Area Concentration in Bubbly Flow [J]. J. Nucl. Eng. Design, 1990, 120(2/3): 163-180.
- [5] Tavera F J, Escudero R, Finch J A. Gas Holdup in Flotation Columns: Laboratory Measurements [J]. Int. J. Miner. Process., 2001, 61(1): 23-40.
- [6] Lo C S, Hwang S J. Local Hydrodynamic Properties of Gas Phase in an Internal-loop Airlift Reactor [J]. Chem. Eng. J., 2003, 91(1): 3-22.
- [7] Zhao D J, Guo L J, Lin C Z, et al. An Experimental Study on Local Interfacial Area Concentration Using a Double-sensor Probe [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2005, 48(10): 1926-1935.

- [8] 孙科霞, 陈学俊, 张鸣远, 等. 应用双头电导探针技术测量气液两相泡状流局部参数 [J]. 计量学报, 1999, 20(4): 297–303.
- [9] 高正明, 王英琛, 施力田, 等. 应用电导探针法测定气泡参数 [J]. 化学反应工程与工艺, 1992, 8(1): 105–110.
- [10] 杨建, 张鸣远, 苏玉亮, 等. 水平管泡状流局部实验参数的概率统计方法 [J]. 化工学报, 2002, 53(8): 871–874.
- [11] Wu Q, Ishii M. Sensitivity Study on Double-sensor Conductivity Probe for the Measurement of Interfacial Area Concentration in Bubbly Flow [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1999, 25(1): 155–173.
- [12] 王铁峰, 王金福, 杨卫国, 等. 三相循环流化床中气泡大小及其分布的实验研究 [J]. 化工学报, 2001, 52(3): 198–203.
- [13] 胡宗定, 王一平. 工程电导测试技术 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1990. 33–37.
- [14] 吕术森, 陈雪莉, 于广锁, 等. 应用电导探针测定鼓泡塔内气泡参数 [J]. 化学反应工程与工艺, 2003, 19(4): 344–351.
- [15] Hibiki T, Hogsett S, Ishii M. Local Measurement of Interfacial Area, Interfacial Velocity and Liquid Turbulence in Two-phase Flow [J]. *J. Nucl. Eng. Design*, 1998, 184(2/3): 287–304.
- [16] Shen X Z, Mishima K, Nakamura H. Error Reduction Evaluation and Correction for the Intrusive Optical Out-sensor Probe Measurement in Multi-dimensional Two-phase Flow [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2008, 51(3/4): 882–895.

Signal Quality of Dual-tip Electrical Conductivity Probe for Measurement of Bubble Parameters

HAN Mei¹, SHA Zuo-liang¹, WU Qian¹, ZHANG Nian², WANG Tie-feng², WANG Jin-fu²

(1. Tianjin Key Lab. Marine Resour. Chem., Col. Marine Sci. Eng., Tianjin Univ. Sci. & Technol., Tianjin 300457, China;

2. Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A dual-tip conductivity probe for measurement of bubble parameters in a gas–liquid flow was studied. The effects of the probe structure, measurement circuit and sampling method on the bubble signal quality measured with the probe were investigated, and the measures to improve the signal quality were proposed. The experimental results show that the signal response is faster when the conductive length of probe tips is smaller. This effect becomes insignificant when conductive length is smaller than 0.025 mm. The probe tip should be connected to the cathode of measurement circuit to avoid the electrical oxidation corrosion that caused damage of the probe tip. The better bubble signal response is obtained by using optimum electrical resistance in the measurement circuit with smaller electrical resistance of the probe tip. The improved signals with large difference of 3 V, fast response and little noise are obtained with the optimal conditions.

Key words: dual-tip conductivity probe; signal response; output difference; signal noise; electrical oxidation corrosion