

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108012

液固两相流压降规律及超声法压降测量*

张瀚瑞^{1,2}, 董峰^{1,2}, 谭超^{1,2}

(1. 天津大学电气自动化与信息工程学院 天津 300072; 2. 天津市过程检测与控制重点实验室 天津 300072)

摘要:液固两相流广泛存在于能源动力、石油化工等工业过程,两相流压降作为重要的流动参数,有助于流动建模及流态分析。建立液固两相压降测量模型,提出了一种结合超声多普勒及超声透射衰减的液固两相超声压降测量方法。搭建液固两相流动实验平台,对两相压降规律进行研究。两相混合流速和固相体积分数升高时,液固两相压降均逐渐增加。在固相体积分数为0.28%~1.37%,两相混合流速为0.9~1.65 m/s时,根据液固两相压降测量模型及Churchill模型的超声法得到的两相压降与差压传感器测量的压降平均相对误差为4.93%和5.10%,验证了测量模型的准确性。针对非均匀分布的两相流态进行压降测量,进一步拓展了压降测量模型的应用范围。本研究工作为非侵入超声法测量液固两相压降提供了方法基础。

关键词:液固两相流;超声;流速;固相体积分数;压降;测量模型

中图分类号: TB551 TH812 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Liquid-solid two-phase flow pressure drop and ultrasound-based pressure drop measurement method

Zhang Hanrui^{1,2}, Dong Feng^{1,2}, Tan Chao^{1,2}

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Process Measurement and Control, Tianjin 300072, China)

Abstract: Liquid-solid two-phase flow is widely used in energy, petrochemical and other industrial processes. The pressure drop of two-phase flow is an important flow parameter which is helpful for flow modeling and analysis. A liquid-solid two-phase pressure drop measurement model is formulated. An ultrasonic-based liquid-solid two-phase pressure drop measurement method is proposed, which combines the ultrasound Doppler and ultrasound transmission attenuation. A liquid-solid two-phase flow experiment platform is established to study the law of two-phase pressure drop. As the two-phase mixing flow rate and the solid phase volume fraction increase, the pressure drop of the liquid-solid two phases gradually increases. When the solid phase volume fraction is 0.28%~1.37% and the two-phase mixing flow rate is 0.9~1.65 m/s, the average relative errors between the two-phase pressure drop measured by the liquid-solid two-phase pressure drop measurement model and the Churchill model using the ultrasound method and the pressure drop measured by the differential pressure sensor are 4.93% and 5.10%, respectively. These results show the accuracy of the measurement model. The pressure drop measurement for the two-phase heterogeneous flow is carried out and it further broadens the application range of the pressure drop measurement model. This research work provides a basic method for non-invasive ultrasound measurement of liquid-solid two-phase pressure drop.

Keywords: liquid-solid two-phase flow; ultrasound; flow rate; solid phase volume fraction; pressure drop; measurement model

0 引言

液固两相流大量存在于自然界、工业管道运输、循

环流化床反应过程中,例如泥沙输送、制冷冰浆流动、可燃冰输运及矿物开采等^[1-5]。压降作为液固两相流体流动的重要参数,可以有效表征流动情况,且决定了液固两相流动实验中泵的功率,因此准确获取液固两

收稿日期:2021-05-29 Received Date: 2021-05-29

* 基金项目:国家自然科学基金项目(61973229, 51976137)、天津市自然科学基金重点项目(19JCZDJC38900)资助

相压降及变化规律对于两相装置的设计及提高能量利用率十分重要。

研究人员针对液固两相流体流动过程建模分析并测量,以研究两相流压降变化规律。Doron 等^[6-7]针对液固两相流提出了一种两层模型,对于给定浆体流量、固相体积分数、管道结构及两相物性参数,可以预测液固两相流压降和流型,还提出了一种三层模型解决了由低速床层流动引起模型误差。Lali 等^[8]提出了一种基于能量守恒方程的压降理论计算模型,研究发现固相体积分数的增加会提高湍流强度及粘性阻力。Matoušek^[9]提出了一种可预测沉降浆管固定沉积层高度及压降的模型,模型预测值与实验值相对误差在 $\pm 25\%$ 以内。Aybar 等^[10]在研究单相流、颗粒两相流及多孔介质流动中发现逐渐提升固相体积分数时,两相压降呈抛物线形式增长。杨佳奇等^[11]利用欧拉双流体模型及 Churchill 模型研究水平液固两相流动压降及流型等,并通过实验数据验证了数值计算结果。Messa 等^[12-13]基于双流体模型及固相壁面条件建立水平管完全悬浮泥浆液数值模型,其压力梯度计算结果与实验结果相差 $\pm 10\%$ 以内,且模型可以得到由于重力效应引起的浓度及速度剖面分布非均匀性现象。Lyu 等^[14]通过研究不同类型颗粒在下流式固定床中的压降变化规律,得出两相压降要比单相压降高,且在低循环流速下,压降随颗粒加入量的增加而减小,在高循环流速下,压降随颗粒加入量的增加而发生波动。上述研究液固两相压降理论模型及压降变化规律通常建立在已知固相体积分数的情况下,然而管道中实际流动的两相流体固相体积分数并不明确。此外利用理论压降模型计算液固两相压降,通常需要两相混合流速及固相体积分数,其测量的准确性直接影响压降模型预测值。现有两相流体压降测量方式主要是通过管道开孔安装导管接入差压传感器或直接安装膜式差压传感器取压^[15],然而在固相颗粒聚集时容易堵塞取压孔进而影响压降测量结果,且在两相压降变化较快时,膜式取压法较慢的响应速度无法满足快速测量要求。

针对以上问题,建立了一种基于均相流假设的水平管液固两相流压降测量模型,提出一种液固两相流压降超声测量方法。超声法作为一种无扰动、成本低测量方法,广泛用于流体流动参数的测量^[16-20]。采用超声多普勒法对液固两相的流速进行测量,可替代电磁流量计等测量仪表等获取的流速^[21-23],利用超声透射衰减法对固相体积分数进行测量,结合压降测量模型获得两相压降测量值,并通过差压传感器测量数据得到验证。该测量方法具有快速响应性,适用于不同工况的液固两相压降测量,目前尚未出现采用超声法进行液固两相压降测量的相关研究。

1 液固两相压降测量模型

1.1 单相流体压降测量模型

根据 Darcy-Weisbach 公式^[24],可得水平圆管中单相流体水头损失 h_f 及压降 P 为:

$$h_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

$$P = \rho g h_f = \lambda \frac{\rho L v^2}{2D} \quad (2)$$

式中: λ 为摩阻系数(也称达西摩擦因子); D 为管道内径; ρ 为单相流体密度; v 为流体平均速度; L 为取压管长度; g 为重力加速度。根据式(3)雷诺数 Re 的计算得到,实验中的流体为紊流状态,摩阻系数采用紊流区的式(4)阿里特苏里公式及式(5)Colebrook 公式计算,采用如下摩阻系数求解方法,将式(4)中摩阻系数计算值作为初值代入式(5)中,简化求解复杂度并降低计算误差^[25]。

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3)$$

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{k_s}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k_s}{3.7D} \right) \quad (5)$$

式中: k_s 为管道内壁粗糙度。

1.2 液固两相流压降测量模型

实验中的固相颗粒均匀分散在管道中,实际液固两相流动图像如图 1 所示,假设液固两相流动满足为均相流动,其混合物性参数同均相流模型。混合粘度采用 Einstein 粘度公式(7)及 Guth 粘度公式(8)^[26],其计算公式适用于固相体积分数较低的情况。由此可以得到液固两相压降测量模型:

$$\rho_m = \frac{m_m}{V_m} = \frac{m_l + m_s}{V_m} = \rho_l(1 - \alpha) + \rho_s \alpha \quad (6)$$

$$\mu_m = \mu_l(1 + 2.5\alpha) \quad (7)$$

$$\mu_m = \mu_l(1 + 2.5\alpha + 14.1\alpha^2) \quad (8)$$

$$Re_m = \frac{\rho_m v_m D}{\mu_m} \quad (9)$$

$$\lambda_{2-p} = 0.11 \left(\frac{k_s}{D} + \frac{68}{Re_m} \right)^{0.25} \quad (10)$$

$$P_{2-p} = \rho_m g h_{2-p} = \lambda_{2-p} \frac{\rho_m l v_m^2}{2D} \quad (11)$$

式中: ρ_m, ρ_l 和 ρ_s 分别为两相混合密度、液相密度和固相密度; m_m, m_l 和 m_s 分别为两相混合质量、液相质量和固相质量密度; V_m, V_l 和 V_s 分别为两相混合体积、液相体积

和固相体积; α 为固相体积分数; μ_m 和 μ_l 分别为两相混合粘度和液相粘度; Re_m 为两相混合雷诺数; P_{2-p} 和 h_{2-p} 为两相压降和水头损失; λ_{2-p} 为两相摩阻系数。已知管道直径及材料, 液固两相压降仅与两相混合流速及固相体积分数有关。

此外, 选取经典 Churchill 压降模型^[27] 与提出的液固两相压降模型进行对比, 其摩阻系数计算如下, 压降公式利用式(11)计算。

$\lambda =$

$$8 \left(\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \left(2.457 \ln \frac{1}{\left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{k_s}{D}} + \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16} \right)^{\frac{3}{2}} \right)^{\frac{1}{12}} \quad (12)$$

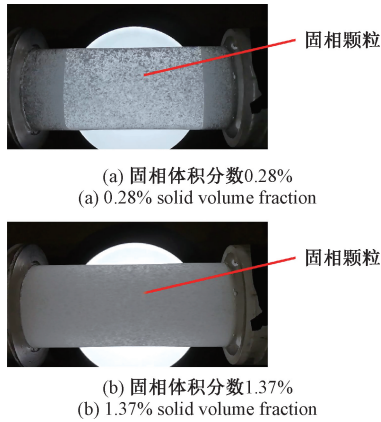


图 1 液固两相实际流动图

Fig. 1 Photos of liquid-solid two-phase flow

1.3 超声多普勒流速测量

脉冲超声多普勒传感器由压电晶片发射若干周期的超声波, 经液固两相流后被离散颗粒反射后被传感器接收。根据多普勒原理, 超声回波信号包含运动离散相的多普勒频移信息, 该频移与离散相运动速度成正比^[28]。此外, 根据超声脉冲回波信号中不同时间延迟 τ 与对应的空间点相对下管壁的距离 x , 可以推算出管道中不同位置的流速值。

$$x = \frac{c\tau}{2} \sin \theta \quad (13)$$

$$v_x = \frac{c}{2f_0 \cos \theta} \Delta f \quad (14)$$

式中: c 为超声波在流体中的声速; θ 为超声波发射方向与管道中流体流动方向之间的夹角; Δf 代表多普勒频移; v_x 为离散相多普勒流速; f_0 为超声波的中心频率。

分析超声脉冲回波信号频谱并提取多普勒频移可以计算管道径向不同位置的流速值, 得到流速剖面信息, 再将流速剖面积分获得颗粒平均流速值。由于研究中固相

体积分数较低且颗粒粒径较小, 认定液固两相无相间滑移, 进而得到式(15)中两相混合流速 v_m ^[29]。

$$\overline{v_m} = \overline{v_x} = \frac{\int_0^D v_x(x) \cdot 2\sqrt{x(D-x)} dx}{A} \quad (15)$$

式中: $\overline{v_x}$ 为平均多普勒流速; A 为管道截面积。

1.4 超声透射法固相体积分数测量

超声透射法采用一组超声传感器对管道内两相流体测量, 超声波从管道一侧传感器发射, 由管道另一侧的传感器接收, 不同固相体积分数影响超声接收信号的衰减测量值。纯水场下的超声接收信号为 V_{water} , 液固两相流超声接收信号为 $V_{two-phase}$, 将超声接收信号进行快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT), 并提取其幅值信息得到 A_{water} 和 $A_{two-phase}$, 因此液固两相超声衰减系数 $\alpha_{coefficient}$ 定义为:

$$\alpha_{coefficient} = -\frac{1}{D} \ln \frac{A_{two-phase}}{A_{water}} \quad (16)$$

超声衰减系数 $\alpha_{coefficient}$ 与固相体积分数 α 存在对应关系, 可以利用超声衰减值对两相流动中的固相体积分数进行推算。

$$\alpha_{coefficient}(\alpha) = f(\alpha) \quad (17)$$

2 实验装置

搭建液固两相流动实验装置测量液固两相压降, 实验平台如图 2 所示。实验具体流程如下: 首先在搅拌罐中加入定量固相颗粒及液相流体, 液相体积由标定桶获得, 固相颗粒质量利用电子秤测量获取, 并在每组固相体积分数实验前投入搅拌罐中。控制搅拌器电机将液固两相混合流体充分搅拌均匀后由泥浆泵吸入, 通过改变泥浆泵的工作频率以得到不同液固两相混合流速, 泥浆泵后端安装的缓冲罐可以有效减少混合流体的脉动效应, 两相混合流体混合流量经电磁流量计测量后流入水平测量管段, 最后流回搅拌罐, 实现两相流体循环流动过程。实验中液相采用自来水, 密度为 998 kg/m^3 , 固相采用聚苯乙烯颗粒, 密度为 1050 kg/m^3 , 颗粒平均粒径为 $300 \mu\text{m}$ 。实验采用电磁流量计测量精度为 $\pm 0.5\%$, 差压变送器测量精度为 $\pm 0.065\%$ 。实验固相颗粒体积分数范围为 $0 \sim 4.26\%$, 两相混合流速范围为 $0 \sim 1.65 \text{ m/s}$ 。

水平实验管段中包括超声多普勒传感器、超声透射传感器及差压传感器, 其中超声多普勒传感器中心频率为 1 MHz , 由研究室自主设计的超声多普勒激励采集 CPCI 板卡实现超声信号激励及回波信号采集, 传感器在管道下方采用透声楔块实现非侵入安装; 超声透射传感器的中心频率为 1 MHz , 由信号发生器及功率放大器作为信号激励源, 示波器作为信号接收端, 分别安装在管道

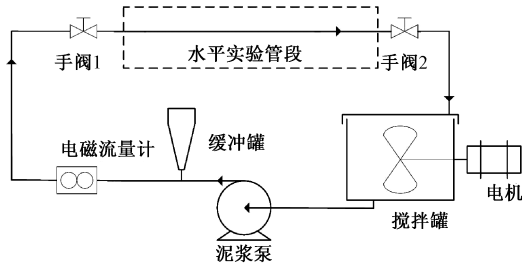


图 2 液固两相流动实验平台

Fig. 2 Liquid-solid two-phase flow

上下部;差压传感器安装在水平测量管段的两端,取压管段总长度为 $35D$,各种传感器安装示意图如图 3 所示。超声多普勒传感器用于获取两相混合流速,与电磁流量计获取的混合流速进行验证,超声透射传感器用于获取固相体积分,结合液固两相压降测量模型可以获得超声法两相压降测量值,并可与差压传感器测量两相压降信息进行验证,电磁流量计及差压传感器测量数据由 NI 公司生产的 PCI6251 板卡采集。

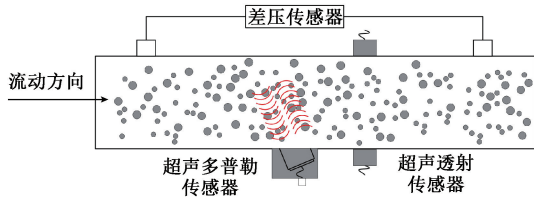


图 3 传感器安装示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sensors installation

3 实验结果及分析

3.1 液固两相流压降变化规律

在液固两相压降测量实验前,通过纯水流动实验验证差压传感器压降测量值的准确性。单相流体压降理论值由式(2)~(5)计算,其中单相流体的流速由电磁流量计测量获取,压降测量值与理论计算值如图 4 所示。当流速逐渐增大时,流体压降逐渐升高,这与理论模型中的流体压降与流速成正比一致,且压降测量值与理论值的相对误差为 2.02%,证明选用的差压传感器可用于后续实验中的液固两相压降测量。

图 5 和 6 为采用电磁流量计结合液固压降测量模型测量的两相流压降,当固相体积分数及混合流速逐渐增加时,两相混合压降均会逐渐提升。固相体积分数增大时,液固两相相间相互作用力强,两相混合流速增大时,紊流作用加速了固相颗粒之间与管壁的碰撞,进而使两相压降增大。

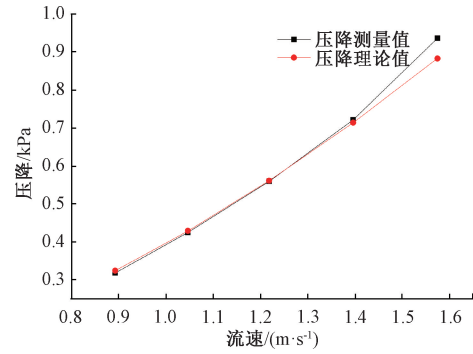


图 4 纯水的压降推算值与测量值

Fig. 4 Calculation and measurement of single water phase pressure drop

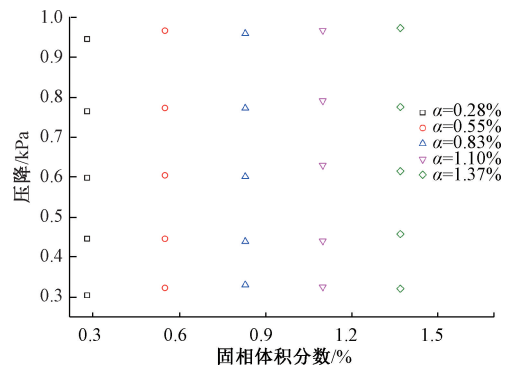


图 5 两相压降测量值

Fig. 5 Measurement of two-phase pressure drop

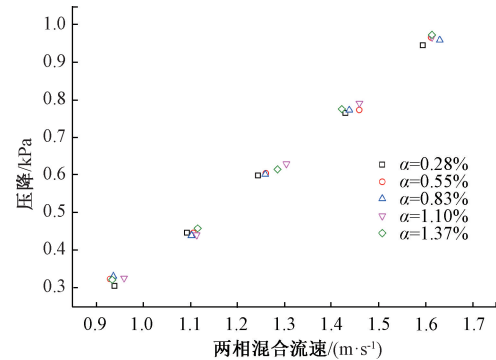


图 6 两相压降测量值

Fig. 6 Measurement of two-phase pressure drop

实验中不同固相体积分数的混合流速调节通过控制泥浆泵的工作频率实现,将泥浆泵工作频率固定从而使液固两相流体保持相同的混合流速,然而不同固相体积分数下,泥浆泵负载不同,即使工作频率相同,电磁流量计两相混合流速测量结果也不尽相同,通过图 6 中部分测量点可以看出,由于混合流速的差异造成了低固相体积分数的两相压降测量值却要比高固相体积分数的现象。

为研究固相体积分数及两相混合流速对液固两相压降的影响,结合液固两相压降测量模型进行数值推导。在固相体积分数为 0.28%、0.83% 及 1.37% 下,以两相混合流速 1 m/s 为基准,混合流速按照基准 0.5%、1% 及 1.5% 小幅增加,结合式(6)~(11)推算出不同固相体积分数下模型测量值。在实验中的固相体积分数范围中,不同粘度公式计算出混合粘度值对两相压降影响较小,在液固两相混合粘度计算中,模型均采用 Guth 粘度公式。

图 7 为不同组数的压降模型预测值,通过图中可以得到,两相混合流速从 1 m/s 增加至 1.005 m/s 时,固相体积分数为 0.28% 的液固两相压降模型预测值已经高于固相体积分数为 1.37% 的两相压降,这说明了在液固两相压降测量中,相较固相体积分数,两相混合流速的变化对两相压降的影响更加明显,这与实验测量结果保持一致。这是由于在低固相体积分数实验组中,固相体积分数变化引起的两相混合密度及混合粘度差异过小,在两相压降模型中雷诺数及摩阻系数的计算中,混合流速仍占主要影响因素。

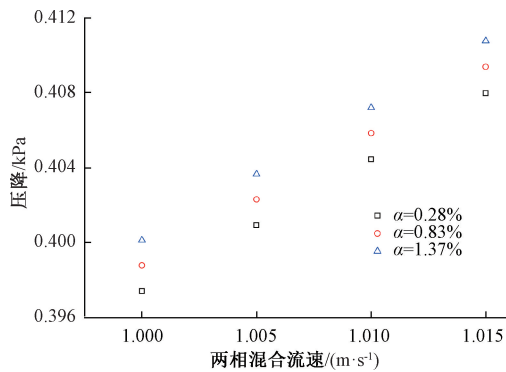


图 7 两相压降模型预测值

Fig. 7 Prediction value of two-phase pressure drop

3.2 液固两相超声多普勒压降测量结果

1) 两相混合速度测量

受限于超声多普勒传感器的性能,实验中固相体积分数在 0.28%~1.37% 时可接收有效回波信号,通过式(13)~(15)计算超声多普勒液固两相混合流速测量值,并与电磁流量计的测量值进行对比,其中超声多普勒混合流速为固定液固两相混合流量进行多次实验对超声回波数据处理后取平均值得到。表 1 为不同固相体积分数下超声多普勒流速测量结果 V_{Dop} 与电磁流量计流速测量结果 V_{EMFM} ,平均相对误差 RE 为 3.01%。

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n RE(i)}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|V_{Dop}(i) - V_{EMFM}(i)|}{V_{EMFM}(i)}}{n} \times 100\% \quad (18)$$

式中: RE 为相对误差; V_{Dop} 与 V_{EMFM} 分别为超声多普勒流速和电磁流量计流速; n 和 i 分别代表测量总组数和第 i 个测量组。

表 1 液固两相混合流速测量值

Table 1 Measurement of liquid-solid two-phase mixed flow rate

固相体 积分数/%	超声多普勒 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	电磁流量计 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差 (RE)/%
0.28	0.91	0.94	3.19
	1.01	1.09	7.34
	1.21	1.24	2.42
	1.47	1.43	2.80
	1.57	1.59	1.26
0.55	0.90	0.93	3.23
	1.05	1.11	5.41
	1.21	1.26	3.97
	1.48	1.46	1.37
	1.65	1.61	2.48
0.83	0.92	0.94	2.13
	1.05	1.10	4.55
	1.29	1.26	2.38
	1.46	1.44	1.39
	1.64	1.63	0.61
1.1	0.91	0.96	5.21
	1.04	1.11	6.31
	1.22	1.30	6.15
	1.42	1.46	2.74
	1.65	1.61	2.48
1.37	0.92	0.93	1.08
	1.14	1.12	1.79
	1.25	1.28	2.34
	1.45	1.42	2.11
	1.60	1.61	0.62

2) 固相体积分数测量

对纯水及不同固相体积的液固两相流采集多组超声接收信号进行 FFT 处理,取变换后最大幅值的均值代入式(16),得到不同固相体积分数下超声衰减系数。由于不同固相体积分数实验中,即使保证泥浆泵工作在相同频率,两相混合流速的测量值也不完全相同,因此选取同一工作频率的多组超声多普勒流速测量值作为不同的流速范围,其中流速范围 1 为 0.90~0.92 m/s,流速范围 2 为 1.01~1.14 m/s,流速范围 3 为 1.21~1.29 m/s,流速

范围 4 为 1.42~1.48 m/s,流速范围 5 为 1.57~1.65 m/s。此外,取不同实验组数中的超声衰减系数最大值,对液固两相超声衰减系数进行归一化处理。图 8 为不同混合流速范围下的归一化超声衰减与固相体积分数的变化关系。在增大固相体积分数时,超声衰减系数逐渐增大,随着两相混合流速的提升,超声衰减系数逐渐降低。因此超声衰减系数与固相体积分数和两相混合流速直接相关。不同流速范围下的归一化超声衰减与固相体积分数的关系可通过一次线性方程拟合,这 5 组流速范围的拟合曲线与实际归一化超声衰减的平均相关系数为 0.992,在利用超声多普勒获得两相流速后,按照不同的流速范围,可结合超声透射衰减得到的超声衰减系数获得固相体积分数。

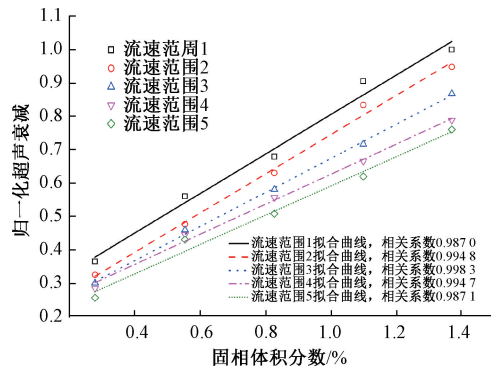


图 8 液固两相实验超声衰减值

Fig. 8 Ultrasound attenuation value of liquid-solid two-phase flow experiments

3) 液固两相压降测量

表 2 为不同固相体积分数下压降测量值,模型测量值为液固两相压降测量模型及 Churchill 模型测量得到,两相混合流速利用超声多普勒传感器获取,固相体积分数由超声透射传感器及拟合的线性方程推算,并结合式(6)~(12)推算出不同固相体积分数下两相压降模型测量值。

通过表 2 可以得到,利用超声法的液固两相测量模型推算出压降值及 Churchill 模型推算出压降值与差压传感器的压降测量值之间的平均相对误差分别为 4.93% 和 5.10%,因此提出超声压降测量方法可以应用于液固两相测量,且两种压降测量模型均可以预测液固两相压降。

3.3 非均匀分布液固两相流压降测量

上述液固两相压降测量实验中,液固两相流动的流态假定为均相流动,然而实际流动中,如果固相体积分数过高或两相混合流速过低时会出现非均相流动情况,其流动示意图如图 9 所示。在具有悬浮层的液固两相流动会出现两种流态:一种情形为管道上方的悬浮层成床

表 2 压降模型测量值及差压传感器测量值

Table 2 Pressure drop model measurement and measurement value by pressure difference sensor

固相体 积分数/%	超声法推 算值/kPa	Churchill 模 型推算值/kPa	差压传感器 测量值/kPa
0.28	0.34	0.33	0.30
	0.40	0.39	0.45
	0.56	0.54	0.60
	0.78	0.77	0.76
	0.88	0.86	0.94
0.55	0.33	0.32	0.32
	0.43	0.42	0.45
	0.56	0.54	0.60
	0.79	0.78	0.77
	0.96	0.94	0.97
0.83	0.34	0.33	0.33
	0.43	0.42	0.44
	0.62	0.61	0.60
	0.78	0.76	0.77
	0.95	0.93	0.96
1.1	0.36	0.33	0.33
	0.45	0.42	0.44
	0.60	0.55	0.63
	0.78	0.72	0.79
	1.02	0.94	0.97
1.37	0.36	0.33	0.32
	0.53	0.42	0.46
	0.63	0.55	0.61
	0.81	0.72	0.77
	0.97	0.94	0.97

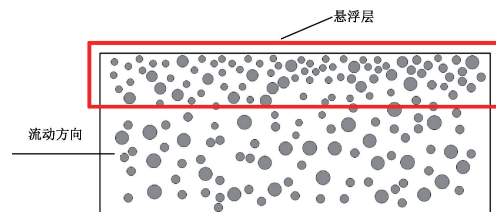


图 9 液固两相非均匀流动示意图

Fig. 9 Schematic diagram of liquid-solid two-phase heterogeneous flow

不流动,下方颗粒流动;另一种情形为管道中所有颗粒均流动,但管截面颗粒相分布不均匀,存在浓度梯度。

实验中,液固两相混合流速低于 0.9 m/s (低混合流速) 或固相体积分数大于 2.7% (高固相体积分数) 时,两相流态会出现非均匀流动。图 10 为低混合流速下超声法压降测量值及差压传感器测量值,两相压降变化规律与两相均匀分布流态一致,且两种测量方法压降值相差较小,说明在低混合流速下,虽然出现悬浮床层流动状态,但由于固相体积分数过低,仍可假设相间无滑移速度对两相压降进行测量。

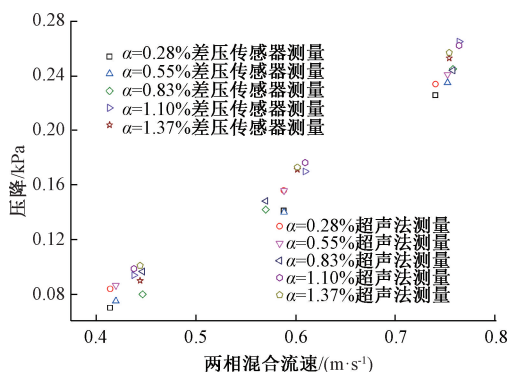


图 10 低固相体积分数及低混合流速下的两相压降
Fig. 10 Two-phase pressure drop under low solid phase volume fraction and low mixed flow rate

图 11 为高固相体积分数的压降模型测量值及差压传感器测量值对比图,其中流速测量值由电磁流量计获得。两种方法压降测量值相差较大,原因是两相流态出现了固定床层移动,使得压降模型中两相分布难以满足均相流条件,产生测量误差。

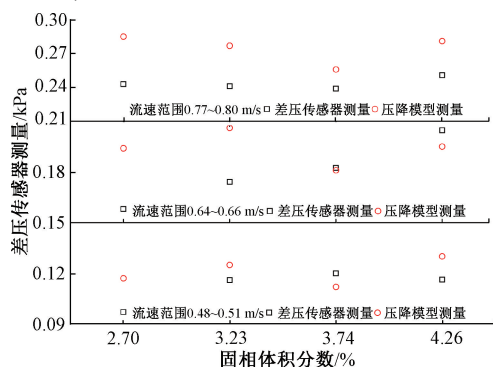


图 11 高固相体积分数及低混合流速下的两相压降
Fig. 11 Two-phase pressure drop under high solid phase volume fraction and low mixed flow rate

非均匀两相分布的压降模型测量值及差压传感器测量值相对误差如图 12 所示。在固相体积分数为 $0.28\% \sim 1.37\%$ 且两相混合流速在 $0.57 \sim 0.80 \text{ m/s}$ 时,相对误差均低于 10% ,大部分在 5% 以下,低固相体积分数及低混合流速的平均相对误差为 6.70% ,说明压降模型

在该流态下具有适用性。然而对高固相体积分数及低混合流速实验组数,平均相对误差为 10.6% ,提出的压降测量模型已无法准确测量两相压降。

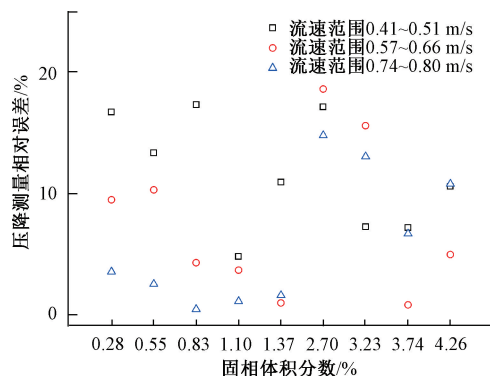


图 12 非均匀两相分布下的压降测量相对误差
Fig. 12 Measurement error of pressure drop under heterogeneous two-phase distribution

综上所述,在两相流动的非均匀状态较弱时,超声多普勒和超声透射衰减测量法仍可以推算两相混合流速及固相体积分数,当较低流速或较高固相体积分数,且两相分布出现固定悬浮床层时,压降模型测量值与差压传感器测量值相差较大。此时超声多普勒测量的流速为悬浮层下的颗粒流速信息,超声透射衰减测量的超声衰减系数则与悬浮层高度有关,得到的超声衰减系数与两相混合流速、固相体积分数三者之间存在耦合关系。

4 结 论

建立液固两相压降测量模型并提出液固两相压降超声测量方法,通过实验测量得到:

1) 在固相体积分数逐渐增大时,液固两相压降增加,且在低固相体积分数实验中,两相混合流速对于压降的影响要高于固相体积分数。

2) 利用超声多普勒进行液固混合流速测量可以有效获取两相混合流速值,与电磁流量计测量相对误差为 3.01% 。

3) 利用超声透射衰减测量方法可以建立超声衰减系数与固相体积分数之间的线性关系,从而利用衰减系数获得固相体积分数测量值。

4) 在不同固相体积分数、混合流速实验中,利用超声多普勒的压降模型测量值与差压传感器测量值的相对误差为 4.93% ,比经典 Churchill 压降测量模型误差小。此外,针对非均匀分布的液固两相流动状态,压降测量模型具有一定的适用性。

液固两相压降超声测量方法可有效获取液固两相压降,为研究液固两相压降测量提供了无需管道开孔的非

侵入测量方法。未来拟更换高性能的超声传感器或提高脉冲激励电压完成高固相体积分数超声多普勒液固两相混合流速的测量以实现两相压降测量,并建立适用于非均相、两相存在滑移速度的液固两相压降超声测量模型。

参考文献

- [1] WANG K, LIU G, LI Y C, et al. Identification and characterization of solids in sand-water two-phase flows via vibration multi-sensor approaches [J]. *Advanced Powder Technology*, 2019, 30(10): 2240-2250.
- [2] RAYHAN F A, PAMITRAN A S, YANUAR. Rheology of ice slurry in circular pipe at different freezing-point depressants[J]. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 2020, 28(1): 205002. 1-205002. 14.
- [3] DU Q, LIU Y, HOU J, et al. Investigation on the secondary generation of natural gas hydrates in horizontal wellbore caused by pressure jump during the depressurization development of hydrate bearing layers[J]. *Geofluids*, 2020, 2020: 1-14.
- [4] 刘勇, 石雯. 管道横向弯曲振动下液固两相流压强损失研究[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2019, 34(1): 115-121.
LIU Y, SHI W. Study on pressure loss of liquid-solid two-phase flow in the pipeline under transverse bending vibration[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2019, 34(1): 115-121.
- [5] 江俊鑫, 刘少军, 胡小舟, 等. 深海扬矿泵内固液两相流动模型研究[J]. *机械科学与技术*, 2020, 39(1): 10-15.
JIANG J X, LIU S H, HU X ZH, et al. Exploring solid-liquid two-phase flow model in lift pump for deep-sea mining [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2020, 39(1): 10-15.
- [6] DORON P, GRANICA D, BARNEA D. Slurry flow in horizontal pipes-experimental and modeling [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1987, 13(4): 535-547.
- [7] DORON P, BARNEA D. A three-layer model for solid-liquid flow in horizontal pipes[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1993, 19(6): 1029-1043.
- [8] LALI A M, JOSHI J B. Pressure drop in solid-liquid fluidised beds[J]. *Powder Technology*, 1989, 59(2): 129-140.
- [9] MATOUŠEK V. Predictive model for frictional pressure drop in settling-slurry pipe with stationary deposit[J]. *Powder Technology*, 2009, 192(3): 367-374.
- [10] AYBAR H S, SHARIFPUR M, VAZIRI R. Experimental investigation of pressure drop in one phase flow, particle-liquid two-phase flow, and porous media consisting of the same particle size [J]. *Defect & Diffusion Forum*, 2009, 283-286: 599-603.
- [11] 杨佳奇, 彭泉霖, 唐颖. 水平圆管内固液两相流的压降及流型分析[J]. *水力采煤与管道运输*, 2014, 9(3): 4-7.
YANG J Q, PENG Q L, TANG Y. Pressure drop and flow pattern analysis of solid-liquid two-phase flow in horizontal circular tube[J]. *Hydraulic Coal Mining and Pipeline Transportation*, 2014, 9(3): 4-7.
- [12] MESSA G V, MALIN M, MALAVASI S. Numerical prediction of fully-suspended slurry flow in horizontal pipes[J]. *Powder Technology*, 2014, 256: 61-70.
- [13] MESSA V, MALAVASI S. Improvements in the numerical prediction of fully-suspended slurry flow in horizontal pipes [J]. *Powder Technology*, 2015, 270: 358-367.
- [14] LYU S Y, JIANG F, QI G P, et al. Pressure drop of liquid-solid two-phase flow in a down-flow circulating fluidized bed [J]. *Powder Technology*, 2020, 375: 136-145.
- [15] LI Q Y, LUO S J, WANG Q M. Piezoresistive thin film pressure sensor based on carbon nanotube-polyimide nanocomposites[J]. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 2019, 295: 336-342.
- [16] DONG F, GAO H, LIU W L, et al. Horizontal oil-water two-phase dispersed flow velocity profile study by ultrasonic doppler method[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 102: 357-367.
- [17] 王兴国, 张路鑫, 尧亮富, 等. 管道内流体流量的超声多普勒测量[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(10): 96-103.
WANG X G, ZHANG L X, YAO L F, et al. Measurement of pipeline flow using ultrasonic Doppler method [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(10): 96-103.
- [18] 贾惠芹, 王成云, 党瑞荣. 流体流速对超声波流量测量精度的影响及校准[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(7): 1-8.
JIA H Q, WANG CH Y, DANG R R. Influence of fluid velocity on ultrasonic wave flowrate measurement accuracy and its calibration [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(7): 1-8.
- [19] SU Q, TAN C, DONG F. Measurement of oil-water two-phase flow phase fraction with ultrasound attenuation [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 18(3): 1150-1159.
- [20] YU H, TAN C, DONG F. Measurement of particle concentration by multi-frequency ultrasound attenuation in

- liquid-solid dispersion [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2020, 68(3): 843-853.
- [21] 葛亮, 黄凯强, 田贵云, 等. 基于电磁检测机理的井下环空流量测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 161-174.
- GE L, HUANG K Q, TIAN G Y, et al. Research on the measurement method of downhole annular flow based on the electromagnetic detection mechanism [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40 (12): 161-174.
- [22] 杨辉跃, 涂亚庆, 彭钰钦. 差分式小口径科氏流量计测量方法实验分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 66-72.
- YANG H Y, TU Y Q, PENG Y Q. Experimental analysis of measurement method for micro coriolis mass flowmeter with differential tubes [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 66-72.
- [23] WANG L Y, LI S W, YE Y, et al. Measurement of flow rate in solid-liquid two-phase flow in pipes at low volume concentration with venturimeter [J]. Measurement, 2019, 138: 409-415.
- [24] KOWALCZUK Z, TATARA M S. Improved model of isothermal and incompressible fluid flow in pipelines versus the Darcy-Weisbach equation and the issue of friction factor [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2020, 891(A5): 1-26.
- [25] 孙载正. 沿程阻力系数计算的简化方法[J]. 山东纺织工学院学报, 1988, 3(2): 19-23.
- SUN Z ZH. A simplified method for calculating the friction factor [J]. Journal of Shandong Textile Engineering College, 1988, 3(2): 19-23.
- [26] FU S Y, FENG X Q, LAUKE B, et al. Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites[J]. Composites Part B Engineering, 2008, 39(6): 933-961.
- [27] WU Z, SUNDEN B. Frictional pressure drop correlations for single-phase flow, condensation, and evaporation in microfin tubes [J]. Journal of Heat Transfer: Transactions of the ASME, 2016, 138(2): 022901. 1-022901. 9.
- [28] POELMA C. Ultrasound imaging velocimetry: A review[J]. Experiments in Fluids, 2017, 58(1): 3: 1-28.
- [29] LIU W, TAN C, DONG X, et al. Dispersed oil-water two-phase flow measurement based on pulse-wave

ultrasonic doppler coupled with electrical sensors [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2018, 67(9): 1-14.

作者简介



张瀚瑞, 2015 年于东北大学获得学士学位, 2018 年于山东大学获得硕士学位, 现于天津大学攻读博士学位, 主要研究方向为液固两相流动参数测量。

E-mail: zhanghanrui@tju.edu.cn

Zhang Hanrui received his B. Sc. degree from Northeastern University in 2015 and received his M. Sc. degree from Shandong University in 2018. He is currently pursuing his Ph. D. degree at Tianjin University. His main research interest is flow parameter measurement of liquid-solid two-phase flow.



董峰, 分别在 1988、1996 和 2002 年于天津大学获得学士、硕士和博士学位, 现为天津大学电气自动化与信息工程学院教授, 天津市过程检测与控制重点实验室主任, 主要研究方向为过程参数检测及控制系统, 工业过程层析成像, 多相流测量及智能信息处理。

E-mail: fdong@tju.edu.cn

Dong Feng received the B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Tianjin University in 1988, 1996 and 2002, respectively. He is currently a professor with the School of Electrical and Information Engineering at Tianjin University. He is the director of Tianjin Key Laboratory of Process Measurement and Control. His research interests include process parameter detection and control system, industrial process tomography, multiphase flow measurement, and intelligent information processing.



谭超(通信作者), 分别在 2003、2006 和 2009 年于天津大学获得学士、硕士和博士学位, 现为天津大学电气自动化与信息工程学院教授, 主要研究方向为过程参数检测及控制系统, 多相流测量及仪器, 工业过程层析成像, 多传感器/数据融合。

E-mail: tanchao@tju.edu.cn

Tan Chao (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Tianjin University in 2003, 2006 and 2009, respectively. He is currently a professor with the School of Electrical and Information Engineering at Tianjin University. His main research interests include process parameter detection and control systems, multiphase flow measurement and instrumentation, industrial process tomography, and multisensor/data fusion.