第 51 卷 第 4 期 化 工 学 报 Vol. 51 №4
2000 年 8 月 Journal of Chemical Industry and Engineering (China) August 2000

研究简报

水平管道气液两相流中空隙率对动态压降信号的影响*

劳力云[1] 张宏建[2] 吴应湘[1] 李东晖[1] 郑之初[1]
(中国科学院力学研究所[1], 北京 100080; 浙江大学工业控制技术国家重点实验室[2], 杭州 310027)

关键词 气液两相流 空隙率 压降
中图分类号 TQ 022.1

引 言

在化工、石油及动力等工程中, 气液两相流动现象极为普遍, 其研究得到了人们的广泛重视. 气液两相流动中的管道平均压降与其他流动条件及参数之间的关系已有较多的研究, 得到了大量数学模型和经验公式可资工程设计应用[1,2], 但对管道压降动态特性的研究还不多见. 而对于两相流系统安全性能的设计和运行状态监控等方面, 管道压降的动态特性无疑是极为重要的参数. 另一方面, 气液两相流动体系中的空隙率是表示气相浓度(含气率)的常用指标之一, 它对确定气液两相流系统的流型、气液分相流量以及管道中的摩擦压降、重力压降和惯性压降起着重要作用. 因此, 研究空隙率对管道动态压降的影响具有重要的工程应用价值.

近年来, 许多学者研究了离散相浓度信号的均值及其方差与流动参数之间的关系, 同时注意到节流元件形成的的压降噪声等参量与离散相浓度之间有一定关系[3~6]. 本文主要对空隙率与管段压降信号方差之间的关系进行研究, 这种关系使得根据一定的工况条件进行空隙率在线估计成为可能.

1 压降信号与空隙率之间的关系

水平管道的气液两相流中, 一定管段上由于摩擦阻力引起的的压降值(即摩阻压降)不仅与空隙率有关, 还与流体流量有关[7]. 下面根据气液两相流的分相流模型对水平管中摩阻压降与空隙率之间的关系进行分析.

基本假定:

(1) 流动由互不掺混的气相和液相两股流体构成, 且各具有自己的平均流速.

(2) 各相沿流动方向 x 的压降梯度 $\frac{dp_{fL}}{dx}$ (液相压降梯度) 和 $\frac{dp_{fG}}{dx}$ (气相压降梯度) 等于各相单独流过该相在两相流中所占流通截面时的压降梯度, 都等于整个两相流的压降梯度 $\frac{dp_T}{dx}$.

1.1 平均压降与空隙率的关系

根据 Darcy 公式, 气相单独流过管道所形成的压降梯度 $\frac{dp_G}{dx}$ 与液相单独流过管道的压降梯度 $\frac{dp_L}{dx}$ 分别为

$$\frac{dp_G}{dx} = \frac{\lambda_G}{d}\frac{q_{mG}^2}{2\rho_G} \tag{1}$$

$$\frac{dp_L}{dx} = \frac{\lambda_L}{d}\frac{q_{mL}^2}{2\rho_L} \tag{2}$$

两相同时流过管道时, 气相的压降梯度 $\frac{dp_{fG}}{dx}$ 与液相的压降梯度 $\frac{dp_{fL}}{dx}$ 分别为

$$\frac{dp_{fG}}{dx} = \frac{\lambda_{G0}}{d_G}\cdot\frac{q_{mG}^2}{2\rho_G}\cdot\frac{1}{\alpha^2} \tag{3}$$

$$\frac{dp_{fL}}{dx} = \frac{\lambda_{L0}}{d_L}\cdot\frac{q_{mL}^2}{2\rho_L}\cdot\frac{1}{(1-\alpha)^2} \tag{4}$$

根据当量直径的定义有

$$d^2 = d_L^2 + d_G^2 \tag{5}$$

由式(3)和式(4)式求出 d_L、d_G 代入上式, 同时注意到基本假定(2), 有

$$\left[\frac{\lambda_{L0}}{\lambda_L}\cdot\frac{1}{(1-\alpha)^2}\cdot\frac{dp_L}{dp_T}\right]^2 + \left(\frac{\lambda_{G0}}{\lambda_G}\cdot\frac{1}{\alpha^2}\cdot\frac{dp_G}{dp_T}\right)^2 = 1 \tag{6}$$

1999-07-12 收到初稿, 1999-09-13 收到修改稿.

联系人及第一作者: 劳力云, 男, 37 岁, 博士, 副教授, 现为中科院博士后研究人员.

* 国家自然科学基金资助项目(No. 59995460 - 5)、中国科学院"九五"重大项目(KZ951 - A1 - 405)和工业控制技术国家重点实验室开放基金资助项目.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

应用通用的 Blasius 公式

$$\lambda_{L0} = C_t\left(\frac{\rho_L v_L d_L}{\mu_L}\right)^{-n} \tag{7}$$

以及

$$\lambda_L = C_t\left(\frac{\rho_L v_{L0} d}{\mu_L}\right)^{-n} \tag{8}$$

综合上面两式，并注意到

$$\begin{cases} \dfrac{v_{L0}}{v_L} = 1 - \alpha \\ \dfrac{d_L}{d} = \left(\dfrac{A_L}{A_P}\right)^{0.5} = (1-\alpha)^{0.5} \end{cases} \tag{9}$$

得

$$\frac{\lambda_{L0}}{\lambda_L} = \left(\frac{v_L}{v_{L0}}\cdot\frac{d_L}{d}\right)^{-n} = (1-\alpha)^{\frac{n}{2}} \tag{10}$$

同理

$$\frac{\lambda_{G0}}{\lambda_G} = \alpha^{\frac{n}{2}} \tag{11}$$

将式(10)和式(11)代入式(6)，并把压降梯度形式改写为压力降形式，可得

$$(\Delta p_T)^2 = (1-\alpha)^{n-4}(\Delta p_L)^2 + \alpha^{n-4}(\Delta p_G)^2 \tag{12}$$

对于式(12)，需要说明以下几点.

(1) 全液相即 $\alpha = 0$ 时，由式(12)知两相压降与液相的分压降一致；全气相即 $\alpha = 1$ 时，两相压降与气相的分压降一致. 这说明该式满足边界条件.

(2) 式中 Δp_T 指稳定流动状态下的压降即压降信号的静态值，实际中应为压降信号的时间平均值.

(3) n 值主要决定于流型，而流型又与 α 和流速密切相关，因此 n 与 α 有关联关系. 从上式中可以看出，影响 $(\Delta p_T)^2$ 值的最主要因素是 α 及气、液相的摩阻分压降.

1.2 空隙率对压力降信号动态特性的影响分析

考虑到实际中压降信号是离散样本 $\Delta p_T(i)$ $(i = 1, 2, \cdots, N)$，故压降脉动信号的方差 D^2 可用下式估计

$$D^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[\Delta p_T(i) - \Delta p_T]^2 \tag{13}$$

式中

$$\Delta p_T = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\Delta p_T(i)$$

根据随机过程的有关知识，上式可化为

$$D^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[\Delta p_T(i)]^2 - (\Delta p_T)^2 \tag{14}$$

记压力降信号 $\Delta p_T(t)$ 的均方值 A^2 为

$$A^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[\Delta p_T(i)]^2$$

借鉴申国强、林宗虎的关于孔板两侧瞬时压降与 Δp_L、Δp_G 之间的关系的有关结论[4]，推测 A^2 与 Δp_L、Δp_G 之间的关系与式(12)有类似的形式是合理的，只是其系数应具有不同的数值，即可表示为

$$A^2 = k_1(\alpha)(\Delta p_L)^2 + k_2(\alpha)(\Delta p_G)^2 \tag{15}$$

式中 k_1，k_2 为与 α 有关的系数. 将式(12)和式(15)代入式(14)，得

$$D^2 = [k_1(\alpha) - (1-\alpha)^{n-4}]\Delta p_L^2 + [k_2(\alpha) - \alpha^{n-4}]\Delta p_G^2 \tag{16}$$

为了分析方便，引入量纲 1 参数

$$r = D/\Delta p_T \tag{17}$$

为了得到 r 与 α 之间的关系，应考虑 $\frac{\Delta p_T}{\Delta p_G}$ 和 $\frac{\Delta p_T}{\Delta p_L}$ 与 α 之间的联系. Lockhart - Martinelli 模型(L - M 模型)给出有关的结果，曾经广泛应用于工程计算，但实际应用表明误差较大，其主要原因是 L - M 模型未考虑压力效应和质量流速的影响. 为此许多研究者提出了改进方法，其中比较方便准确的是 Chisholm 方法，在该方法中两相摩阻压降与气、液各分相摩阻压降之间的关系分别为[1]

$$\begin{cases} \left(\dfrac{\Delta p_L}{\Delta p_T}\right)^2 = 1 + \dfrac{C}{X} + \dfrac{1}{X^2} \\ \left(\dfrac{\Delta p_G}{\Delta p_T}\right)^2 = 1 + CX + X^2 \end{cases} \tag{18}$$

式中 C 主要取决于流动的质量流速和气、液相的密度比[2]. 将式(16)、式(18)代入式(17)，得到

$$r^2 = (1 + CX + X^2)\left[\frac{k_1(\alpha) - (1-\alpha)^{n-4}}{(1-\alpha)^{n-5}}X^2 + \frac{k_2(\alpha) - \alpha^{n-4}}{\alpha^{n-5}}\right] \tag{19}$$

根据分相模型，上式中的参数 X 的主要因素是 α；而当质量流速在一定范围内变化(如小于 1500 $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)时，$C$ 可取固定的值；n 的值则主要取决于流型. 因此，当流量在一定范围内变化且流型变化不大时，r 与 α 之间存在一元函数关系，可以由压降脉动信号的方差 D 确定出气液两相流动的空隙率 α. 而当流动工况的变化范围较大时，上述关系式将会有比较大的变化，就不能仅通过压降脉动信号的方差确定出气液两相流动的空隙率.

2 实验结果与讨论

为了得到压降脉动信号的方差 D 与气液两相流动的空隙率 α 之间的确切关系，通过气水两相流

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Table 1　Void fraction and correspondence of MSD of pressure drop fluctuation

1# ①		2# ①		3# ①		4# ②	
α	D/ Pa	α	D/ Pa	α	D/ Pa	α	D/ Pa
0	12	0	16	0	11	0	126
0.056	34	0.048	23	0.039	24	0.041	219
0.131	77	0.113	72	0.073	52	0.089	381
0.187	138	0.180	131	0.162	123	0.172	661
0.255	151	0.242	143	0.278	164	0.216	725
0.33	168	0.306	158	0.324	181	0.323	815
0.41	191	0.387	174	0.376	196	0.450	917
0.446	201	0.421	195	0.435	216		

①water flow rate $q_{mL} = 0.37$ kg·s^{-1},pipe pressure $p = 0.025$ MPa.

②water flow rate $q_{mL} = 1.33$ kg·s^{-1},pipe pressure $p = 0.055$ MPa.

实验来确定表达式中的有关参数.

实验条件: 内径 40 mm 的水平管道; 气相流量范围 0～6.0 m^3·h^{-1}; 压降测量间距 400 mm.

实验分为两部分. 第 1 部分是将液相流量固定在 0.37 kg·s^{-1}, 通过改变气相流量得到不同的 α, 同时在流动稳定后对差压变送器的输出信号进行采样, 采样频率 200 Hz, 时间长度 60 s, 如此重复进行 3 次, 获得的数据列于表 1(1#～3#)中. α的数值用快关阀法测得; D 由式(14)计算, 在计算前先对采样值进行 5 点平均, 以抑制非流动噪声的干扰. 实验的第 2 部分是将液相流量变为 1.33 kg·s^{-1}, 然后分别对 D 与α之间的关系进行测试. 测试及数据处理的方法与前类似. 目的是了解流量对压降信号动态特性与空隙率关系的作用. 试验数据如表 1(4#)所示.

需要说明的是, 压力降脉动反映压力降的实时波动, 但压力降的脉动方差则反映一段时间中压力降围绕均值的波动大小的时间平均. 另一方面, 用快关阀法测得的空隙率值是一段管道中的平均空隙率, 然而由于管道的流动性, 空隙率的空间分布将转换成为管道截面上的时间分布, 当流动是充分发展的情况下空隙率的空间平均也将等价于截面空隙率的时间平均.

理论上讲, 压降信号动态特征值 r 完全可以根据式(17)从压降信号中获得, 但是实际上实现起来相当困难, 这是因为此时实验装置中产生的静态摩阻压降相当小, 与压降传感器的静态误差在同一数量级上, 因此不能用压降信号的时间平均值作为两相摩阻压降值进行 r 值的计算. 考虑到在本文的实验条件下空隙率一般在 0～0.5 的范围内, 速度滑移比一般不大于 3, 流动时管道内压力在 0.2 MPa 以内, 从而有$\Delta p_T \approx \Delta p_L$, 同时考虑到$\Delta p_L \propto q_{mL}^{2-n}$, 引入 c 代替 r 进行数据处理

$$c = D/q_{mL}^{2-n} \tag{20}$$

得到了较好的效果. 根据表 1(1#～3#)的数据, 采用三次多项式进行最小二乘法拟合, 可得在对应工况下 D 与α的关系为

$$D(\alpha) = -0.354\times10^3\alpha^3 - 0.447\times10^3\alpha^2 + 0.706\times10^3\alpha + 5.54 \tag{21}$$

拟合曲线示于图 1. $\alpha = 0$～0.5 的范围内, 相当于α的拟合误差平均值约 0.03, 少数点误差较大, 最大拟合误差为 0.08.

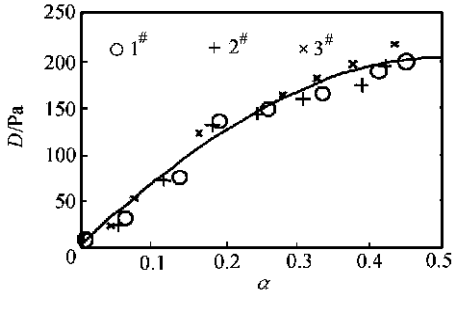

Fig. 1　Relationship between MSD of pressure drop fluctuation and void fraction

(water flow rate $q_{mL} = 0.37$ kg·s^{-1}, pipe pressure p = 0.025 MPa)

同理, 根据表 1(4#)的数据, 采用三次多项式进行最小二乘法拟合, 可得在给定工况下 D 与α的关系为

$$D(\alpha) = 0.299\times10^4\alpha^3 - 0.634\times10^4\alpha^2 + 4.06\times10^3\alpha + 97 \tag{22}$$

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

上式与式(21)相比有很大的不同，这是由于两者液相流量的差异造成的. 另外在上两式中，当 $\alpha=0$ 时，两式均不为 0，这显然是由于单相流体中存在的固有噪声引起的，应在相应的各压降信号均方差中予以扣除，为此需再用式(20)对压降均方差进行进一步处理. 采用这种处理方法并利用 1# ～ 4# 数据组回归出式(20)中 n 的值为 0.84，且式(20)的多项式拟合式为

$$c(\alpha) = -0.651\times10^3\alpha^3 - 1.988\times10^3\alpha^2 + 2.379\times10^3\alpha \tag{23}$$

上式的曲线示于图 2. 曲线的趋势与两种工况下的数据点都比较吻合，这说明式(23)中 c 值在一定的工况下(管道内径 40 mm，水流量低于 1.33 kg·s^{-1}，空隙率低于 0.5)，较大程度上消除了液相流量的影响而与 α 成单调函数关系. 在 $\alpha<0.5$ 的条件下，各点的拟合误差都比较均匀，α 的拟合误差平均值约 0.05，只有少数点误差可达 0.07. 另外，在严格意义上，气相流量的变化也将对压力降带来一定的影响，但是由于一般气体的密度较小，在管道压力较低及空隙率也较小(小于 0.5)时，其主要的结果是导致了压力降脉动值的明显变化，对于压力降均值的影响不显著. 实际的测量结果也证实了这一点.

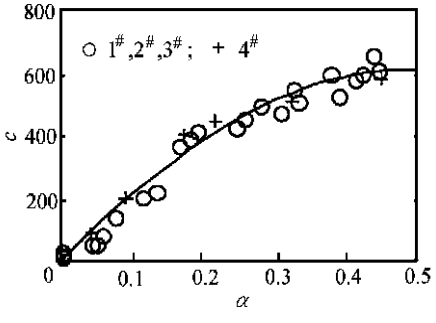

Fig. 2 Relationship between parameter c and void fraction

3 结 论

本文首先研究了基于分相流模型的压降与空隙率及气液分相摩阻压降之间的关系，在此基础上研究了空隙率对压降信号均方差的影响. 对于以水-空气为介质、管道内径 40 mm、水流量低于 1.33 kg·s^{-1}、空隙率低于 0.5 的工况下进行的实验结果表明，液相流量一定而空隙率低于 0.5 的条件下，压降信号均方差与空隙率之间存在单调对应关系；当考虑了液相流量变化的影响后，两种流量下压降信号均方差与空隙率之间的特性关系也很接近. 用三次多项式拟合的方法给出了脉动压降信号均方差与空隙率之间的函数关系. 空隙率的拟合误差平均值约 0.05，只有少数点误差达到 0.07 以上. 上述关系对于工程中在一定工况下实现气液两相流系统运行状态的在线监测具有实用价值.

符 号 说 明

A_L ——液相在两相流中的当量面积，m^2

A_P ——管道截面积，m^2

C ——Chisholm 系数

C_t ——Blasius 系数

D ——管段压力降信号均方差，Pa

d ——管道直径，m

d_G，d_L ——分别为气相、液相在两相流中的当量直径，m

n ——Blasius 指数

p ——压力，Pa

Δp_T ——两相流管段压力降，Pa

q_{mG}，q_{mL} ——分别为气相、液相质量流量，kg·s^{-1}

r ——两相流管段压力降均方值与均值之比

v_L ——液相流速，m·s^{-1}

v_{L0} ——液相折算流速，m·s^{-1}

X ——Martinelli 参数

α ——空隙率

λ_G，λ_L ——分别为分气相、分液相摩阻系数

λ_{G0}，λ_{L0} ——分别为全气相、全液相摩阻系数

μ_L ——液相平均黏度，Pa·s

ρ_G，ρ_L ——分别为气相、液相密度，kg·m^{-3}

References

1 Chen Zhihang(陈之航), Cao Bailing(曹柏林), Zhao Zaisan(赵在三). Gas - liquid Two - phase Flow and Heat Transfer(气液双相流动与传热). Beijing: Mechanical Industry Press, 1983

2 Chen Xuejun(陈学俊), Chen Lixun(陈立勋), Zhou Fangde(周芳德). The Basis of Gas - liquid Two - phase Flow and Heat Transfer (气液两相流与传热基础). Beijing: Science Press, 1995

3 Kozma R. Int. J. Multiphase Flow, 1995, 21: 241—251

4 Shen Guoqiang(申国强), Lin Zonghu(林宗虎). Metrology Acta (计量学报), 1993, 14(2): 140—145

5 Tong Yunxian(佟允宪), Wang Wenran(王文然), Zhong Shuoping (仲朔平), Yu Meiying(俞美英). Journal of Qinghua University (清华大学学报), 1991, 31(3): 12—17

6 Tong Yunxian(佟允宪), Wang Wenran(王文然), Wang Zhixuan (王志宣). Journal of Qinghua University(清华大学学报), 1992, 32(6): 13—17

7 Lao Liyun(劳力云). Identificatin of Two - phase Flow Parameters

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Based on the Analysis of Dynamic Pressure Drop: [dissertation] (学位论文). Hanzhou: Zhejiang University, 1998

INFLUENCE OF VOID FRACTION ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF PRESSURE DROP FLUCTUATION IN HORIZONTAL GAS - LIQUID TWO - PHASE FLOW *

Lao Liyun[1] **, Zhang Hongjian[2], Wu Yingxiang[1], Li Donghui[1] and Zheng Zhichu[1]

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences[1], Bejing 100080;

The National Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University[2], Hangzhou 310027)

Abstract The influence of void fraction on dynamic characteristics of pressure drop fluctuation in the gas - liquid two - phase flow in a horizontal pipe is investigated in this paper. By analyzing the relationship between pressure drop and void fraction on the separated flow model, the effect of void fraction on the Mean - Square Deviation (MSD) of pressure drop fluctuation and the correlation between the parameter r (the ratio of MSD of pressure drop fluctuation to the pressure drop of gas - liquid flow) and the void fraction α are obtained. The value of r mainly depends on void fraction when the flow is full developed and under certain flow regime. Experiments are conducted in a horizontal air - water flow facility with a test section of inner diameter 40 mm. The distance between the upper tapping point and lower tapping point of pressure drop is 400 mm. The flow rate of air varies from 0 to 6 $m^3 \cdot h^{-1}$ in accordance with need. Two different water flow rates are used during experiments: 0.37 $kg \cdot s^{-1}$ and 1.33 $kg \cdot s^{-1}$. The pressure drop signal is measured by differential pressure transducer and sampled by computer with a sampling frequency of 200 Hz. The length of every signal sample is 60s and the sampling process was repeated 3 times under each test condition. Experiment results show that the MSD of pressure drop signal corresponds to void fraction in a monotonic relation under certain flow conditions. Two trends of correlation between the MSD of pressure drop fluctuation and void fraction under two different water flow rates are similar when void fraction is lower than 0.5.

Keywords gas - liquid two - phase flow, void fraction, pressure drop

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 59995460 - 5).

** To whom correspondence should be addressed.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net