

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413163

水平气液两相流压降实验和预测模型研究*

王 蜜^{1,2}, 白雨铎^{1,2}, 刘杰贵^{1,2}, 董 鹏^{1,2}, 方立德^{1,2}

(1. 河北大学质量技术监督学院 保定 071002; 2. 计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心 保定 071002)

摘要:气液两相流广泛存在于化工、石油和天然气输送、核工业等领域,压降作为气液两相流重要参数之一,其准确测量和精确预测是两相流流量计量的重要前提。设计了压降测量系统,并在压力范围为0.1~0.5 MPa的工况下进行实验,获得了内径50 mm水平气液两相流不同压力下的压降实验数据,分析讨论了实验特征参数对压降的影响规律。建立了压降实验数据库并对已有压降预测模型进行对比验证,结果表明已有压降模型对于中高压、大管径压降预测效果较差。在此基础上,通过分析实验参数相关性,提出了一种新的压降预测模型。将新模型与压降实验数据库进行比较,93%以上的数据点的相对误差在±30%以内,且平均绝对百分比误差为13.57%,验证了新压降预测模型的外推性和适用性。

关键词:气液两相流;均相模型;压降;摩擦因子

中图分类号: TH814 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 440.55

Experimental and modeling studying on pressure drop in horizontal gas-liquid two-phase flow

Wang Mi^{1,2}, Bai Yuxin^{1,2}, Liu Jiegui^{1,2}, Dong Peng^{1,2}, Fang Lide^{1,2}

(1. College of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China;

2. National and Local Joint Engineering Research Center for Measuring Instruments and Systems, Baoding 071002, China)

Abstract: Gas-liquid two-phase flow is prevalent in various fields such as chemical engineering, petroleum and natural gas transportation, and the nuclear industry. As a crucial parameter of gas-liquid two-phase flows, pressure drop is essential for the accurate measurement and precise prediction of two-phase flow rates. In this paper, a pressure drop measurement system is designed, and experiments are carried out under the pressure range of 0.1~0.5 MPa. Pressure drop is measured for horizontal gas-liquid two-phase flow in the pipe with an inner diameter of 50 mm at different pressures. The influence of experimental characteristic parameters on pressure drop is analyzed and discussed. A pressure drop experimental database is established and existing pressure drop prediction correlations are compared and verified. The results indicate that the existing pressure drop correlations are not applicable to high pressures and large-diameter pipes. Therefore, a new pressure drop correlation is proposed based on the analysis of the experimental parameters. When compared with the experimental database, over 93% of experimental data exhibit a relative error within ±30%, and the mean absolute percentage error is 13.57%. This verifies the extrapolative capability and applicability of the new pressure drop prediction correlation.

Keywords: gas-liquid two-phase flow; homogeneous correlations; pressure drop; frictional factor

0 引 言

气液两相流动在许多工业应用中扮演着至关重要的

角色,例如化工、石油和天然气输送、核工业和制冷系统等^[1-4]。压降作为气液两相流的重要特征参数之一,其准确测量和精确预测对于系统设计以及安全评估至关重要^[5]。然而,气液两相流的流型多变,不同流型下的流动

收稿日期:2024-08-13 Received Date: 2024-08-13

* 基金项目:河北省自然科学基金项目(F2024201038)、河北大学高层次人才科研启动项目(521100222043)、河北大学在读研究生创新能力培养资助项目(HBU2024SS009)资助

阻力和传热特性各异,与单相流相比两相流压降计算过程更加复杂,导致其成为一项挑战性课题。

直管中两相流压降可以分为加速度压降、重力压降和摩擦压降,其中摩擦压降在水平两相流动中起主要作用。研究表明,建立压降特征参数预测模型对于优化两相流流体动力学理论和构建两流体封闭控制方程具有重要意义^[6]。诸多学者通过理论与实验相结合建立了许多压降预测模型,主要包括均相模型和分相模型^[7]。

1949 年,Lockhart 等^[8]在单项摩擦压降的基础上引入摩擦压降修正系数,提出了经典的气液两相流压降分相模型(Lockhart-Martinelli 模型, L-M 模型)。1967 年,Chisholm^[9]对于 L-M 模型在湍流-湍流状态下预测误差大的问题,考虑了气液两相间的界面剪切力,针对不同的流型提出了不同的 Chisholm 参数 C ,建立了适合于气液两相常压条件下的压降预测模型(Chisholm 模型)。由于 L-M 模型和 Chisholm 模型是基于流体动力学建立的数学模型,具有深入研究流体流动行为、准确预测压降特征参数以及优化流体系统设计的优势,近年来众多学者大多针对以上两种模型,结合物理假设,建立适合于不同工况条件的压降新模型。2021 年,Kang 等^[10]利用 Chisholm 模型对水平气液两相流常压低速过渡状态下的压降实验数据进行预测,结果表明 Chisholm 模型难以适用于低速下层流向湍流过渡中的压降预测,为此将雷诺数对于摩擦因子的影响考虑在内,提出了两相过渡状态混合摩擦因子新模型。2023 年,Zheng 等^[11]评估了 Chisholm 模型的适用性,表明该模型对于含液率较高的段塞流预测误差较大,因此将 C 与雷诺数相结合,建立了适用于中高压条件下的压降新模型,该模型的误差范围在 $-60\% \sim 30\%$ 之间,预测误差相对较大。2023 年,Zhang 等^[12]使用 Chisholm 模型对 3.12 mm 高温绝热状态下的压降实验数据进行预测,结果显示预测值与实验值之间的误差大于 -70% ,这表明 Chisholm 模型难以适用于微管工况条件。基于此,联立气液雷诺数之比,重新拟合了参数 C ,建立了适合于高温绝热下微管内的压降新模型,该模型能较好地预测实验数据,平均相对误差为 18.17%。虽然分相模型考虑了气液两相间的复杂相互作用,但其在使用过程中需要对流型进行准确识别,使其受限于特定的流动工况条件,增加了该模型的使用难度。同时,分相模型在计算时需要同时求解各相方程,大量的计算参数增加了模型复杂度,导致计算成本和时间显著增加。

相较于分相模型较窄的使用范围和复杂的计算过程,均相模型更加简单,计算效率更高,且具有更广阔的应用范围。20 世纪中期,随着核工业、化学工程和石油工业的发展,研究人员开始认识到多相流动问题的复杂性,均相模型作为一种简化的多相流模型,被用来描述

气液两相流动。1982 年,Beattie 等^[13]基于 Colebrook-White 方程改进了截面含气率和黏度的计算公式,在此基础上提出一种隐式摩擦因子计算公式,将摩擦因子方程和 Fanning 方程结合进而求得压降。2003 年,García 等^[14]对常压下不同黏度以及不同流型的水平气液两相摩擦因子实验数据进行整理,发现在两相黏度中液相黏度起主要作用,因此使用液体流动的运动黏度代替两相气液流动的运动黏度,以此来定义两相流动的雷诺数,并基于此,针对不同的流型提出了统一的摩擦因子预测模型,该模型可使得 75.73% 数据的相对误差在 $\pm 29\%$ 以内。

尽管前人提出了众多水平气液两相流压降模型,但是大多数针对常压管道的特定流型,很难获得一种准确而通用的方法来预测中高压流动条件的压降。然而,在实际工业生产中,管道内压力通常较大且流动条件复杂,绝大多数情况下难以判断现场流动情况。因此,在对比前人压降预测模型的基础上,对中高压水平管内压降进行了实验研究,建立了适用于不同管径、不同压力、不同流型条件下的压降预测均相模型,并对新模型的准确性和适用性进行了评价。

1 实验测量系统设计

1.1 压降测量系统

差压变送器测量管节的材质为不锈钢,顶部设有两个相距 550 mm 的取压口,如图 1 所示。差压测量装置采用了罗斯蒙特公司生产的 3051 型差压变送器,其输出电压为 1~5 V,压降的测量范围为 0~6.216 kPa,精度可达 0.04%。差压变送器测量的差压为 p ,两个取压口之间的距离为 L ,从而计算出压降 dp/dL 。数据采集系统的采样频率为 2 kHz,用于记录和存储从差压变送器获取的差压数据,最终将数据传输到计算机行保存和处理。

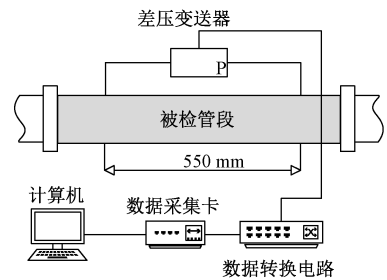


图 1 压降测量系统

Fig. 1 Pressure drop measurement system

1.2 实验装置

实验在天津大学双闭环湿气实验装置上进行,实验装置如图 2 所示。该实验装置包括气相回路和液相回路,测试管道的内径为 50 mm。液体标准流量计为电磁

流量计,在 $0.05 \sim 8 \text{ m}^3/\text{h}$ 范围内测量精度为 0.35% 。气体标准流量计采用涡轮流量计,在 $10 \sim 400 \text{ m}^3/\text{h}$ 范围内能达到 1.0% 的测量精度。在液相回路中,水通过水泵进入液相循环;在气相回路中,空气通过活塞风机进入到气相循环,空气被压缩到所需压力后,经由气液混合器与液相混合,产生气液两相流。在被检管段处进行压降测量,气液两相流通过分离器分离为空气和水,随后两相流体分别流回各自的循环回路中。

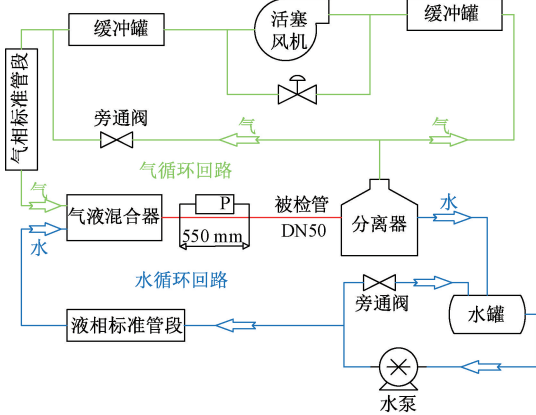


图2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

1.3 实验条件设定

由于所用的实验装置能力有限,产生的工况条件较少,因此选取 Laurinat 等^[15-18]用于扩充本文压降实验数据库,以便后续压降模型的建立和验证。所需的实验工况条件如表1所示,其中气相表观流速(gas superficial velocity, u_{sg})范围为 $5 \sim 30 \text{ m/s}$,液相表观流速(liquid superficial velocity, u_{sl})范围为 $0.0015 \sim 0.6 \text{ m/s}$,系统压力(pressure, P)为 $0.1 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 。

表1 实验工况条件

Table 1 Experimental operating conditions

实验参数	实验工况条件
$u_{sg}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	5, 10, 15, 20, 25, 30
$u_{sl}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.015, 0.035, 0.06, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6
P/MPa	0.1, 0.3, 0.5

大多数学者通过绘制 Baker 流型图反映实验工况,例如:孙宏军^[19]、赵宁^[20]等。利用 Baker 流型图绘制了水平气液两相流流型图,如图3所示,其中 x 轴和 y 轴分别为 $\rho_g u_{sg} \psi$ 和 $\rho_l u_{sl} / \lambda$, ψ 和 λ 为修正系数。从图中可以看出,实验工况条件所处流型包括雾状流、环状流、波状流和分层流。

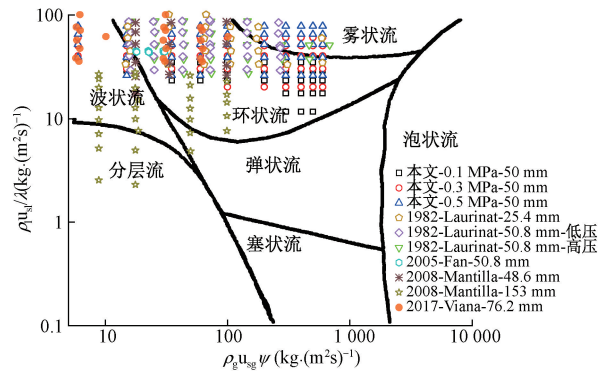


图3 实验工况条件 Baker 流型图

Fig. 3 Baker manifold diagram of experimental conditions

2 实验结果分析

为了研究气液两相流特征参数对 dp/dL 的影响,给出了不同 P 下, dp/dL 随 u_{sg} 和 P 的变化规律如图4(a)所示。可以观察到,随着 u_{sg} 的增大, dp/dL 逐渐增大,且增长趋势逐渐变大,这是由于随着 u_{sg} 的增加,气液两相之间的速度差增大,从而加强了气液界面的剪切力,导致气液界面的摩擦压降增大;同时在气相的带动下,液相速度也会有一定的增加,从而加强了液-壁之间的剪切力,导致液-壁之间的摩擦压降增大。此外,随着 P 的增加, dp/dL 也逐渐增大,且上升趋势更加快速,产生这种现象的主要原因是: P 增加,导致气相密度变大,致使气-液界面的剪切应力增大,从而增加了摩擦压降。

为了更加清楚的观察 dp/dL 随 u_{sl} 的变化,当 P 为 0.5 MPa 时,给出了 dp/dL 随 u_{sl} 的变化规律,如图4(b)所示。由图可知,在 P 和 u_{sg} 相同的情况下,随着 u_{sl} 的增大, dp/dL 先快速增长,然后缓慢增长,紧接着又快速增长。这是由于液速较小时,气液两相流处于分层流状态,顶部气-壁之间的摩擦压降起主要作用,随着 u_{sl} 的增加,两相趋近于环状流,管道顶部产生一层薄液膜,顶部摩擦压降由气-壁向液-壁转变,与气相黏度相比,液相黏度更高,这导致管道内摩擦压降急剧增大;当 u_{sl} 继续增大,管道内流体完全处于环状流,此时 dp/dL 随着 u_{sl} 的增加稳定增大;当 u_{sl} 继续增大,管道内的流型逐渐转变为环雾流,此时管道内液滴夹带较多,大量液滴与空气接触,导致 dp/dL 急剧增大。

3 压降预测模型建立

3.1 已有压降模型分析

Lockhart 等^[8]通过定义两相乘数 φ^2 和 Lockhart-Martinelli 参数 X ,提出了一种经典的两相流压降预测模

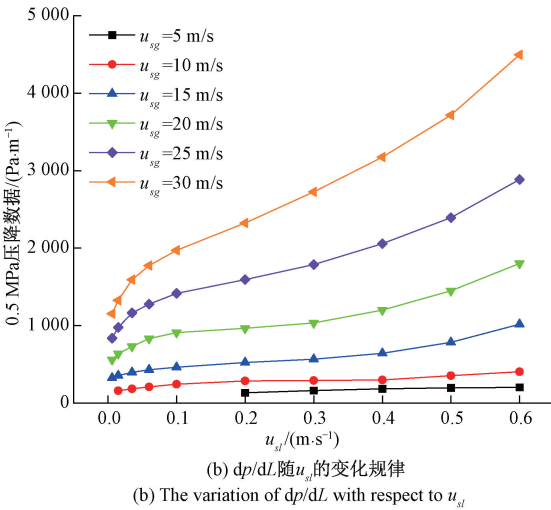
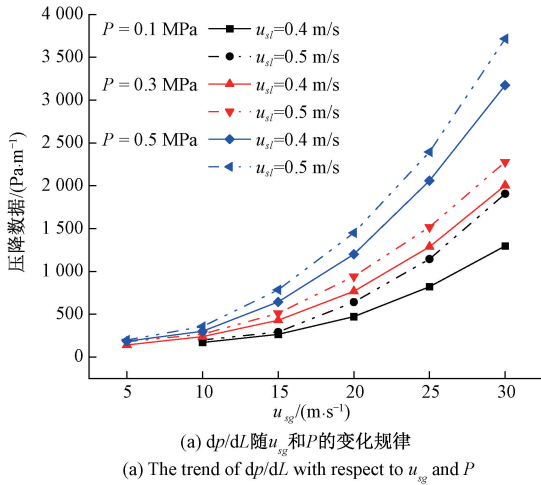


图 4 不同工况下压降变化规律

Fig. 4 The variation law of pressure drop under different working conditions

型,如下所示。

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{TP} = \phi_l^2 \left(\frac{dp}{dL}\right)_l = \phi_g^2 \left(\frac{dp}{dL}\right)_g \quad (1)$$

$$X^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dL}\right)_l}{\left(\frac{dp}{dL}\right)_g} \quad (2)$$

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_l = \frac{2f_l G^2 (1-x)^2}{D\rho_l} \quad (3)$$

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_g = \frac{2f_g G^2 x^2}{D\rho_g} \quad (4)$$

$$\begin{cases} f = \frac{16}{Re}, & Re < 2\,300 \\ f = 0.079Re^{-0.25}, & Re > 2\,300 \end{cases} \quad (5)$$

其中, f 是 Fanning 摩擦因子(下标 g, l, m 分别代表

气相、液相、混合,下同), $(dp/dL)_{TP}$ 表示两相摩擦压降, G 代表总质量流速, x 表示干度, Re 为雷诺数(Reynolds number, Re)。

1967 年, Chisholm^[9] 基于 L-M 模型进行改进, 考虑了相之间的界面剪切力, 并通过对大量实验数据分析和总结, 提出了一个包含参数 C 的方程, 用于更准确地预测气液两相流中的摩擦压降, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} \phi_l^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \\ \phi_g^2 = 1 + CX + X^2 \end{cases} \quad (6)$$

2023 年, Zheng 等^[11] 评估了 Chisholm 模型的适用性, 结果表明该模型对于高含液率下的段塞流预测误差较大, 为此对参数 C 重新进行拟合, 建立了适用于中高压条件下的压降新模型。

2023 年, Zhang 等^[12] 通过实验对比发现 Chisholm 模型对于压降的预测受限于管径, 因此, 对内径 3.12 mm 的高温管内绝热气液两相流动进行了实验研究, 基于不同的流型, 在 Chisholm 公式的基础上对参数 C 进行了改进。以上学者改进的参数 C 如表 2 所示。

1982 年, Beattie 等^[13] 基于 Colebrook-White 方程提出一种隐式摩擦因子计算方程(如式(7)所示), 将该方程与 Fanning 方程(如式(8)所示)相联立, 得到了一种简单的压降预测方法。

$$\frac{1}{\sqrt{f_m}} = 3.48 - 41g[2\varepsilon/D + 9.35/Re\sqrt{f_m}] \quad (7)$$

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{TP} = \frac{2f_m \rho_m u_m^2}{D} \quad (8)$$

$$\rho_m = \rho_l(1-\beta) + \rho_g\beta, \mu_m = \mu_l(1-\beta) + \mu_g\beta, \quad (9)$$

$$u_m = u_{sl}(1-\beta) + u_{sg}\beta$$

其中 f_m 为混合摩擦因子, ε 是表面粗糙度, D 是管道内径, β 代表截面含气率, μ 为动力黏度, ρ 表示密度, u 是表观流速。

2003 年, García 等^[14] 对 2 435 个常压下不同粘度以及不同流型气液两相摩擦因子实验数据进行整理, 提出新的两相流摩擦因子模型(如式(10)所示), 将其与 Fanning 方程相结合得到压降。

$$\begin{aligned} f_m = & 0.0925Re^{-0.2534} + \\ & \frac{13.98Re^{-0.9501} - 0.0925Re^{-0.2534}}{\left(1 + \left(\frac{Re}{293}\right)^{4.864}\right)^{0.1972}} \end{aligned} \quad (10)$$

本文选取了其中 4 个相对经典的压降模型进行评估, 将压降预测模型与本文所有的实验数据进行对比, 如图 5 所示。为了验证模型的准确性, 本文建立了相应的评价体系如式(11)和(12)所示来衡量对比结果的吻合性。

表2 不同学者的 Chisholm 参数

Table 2 Chisholm parameters of different scholars

学者	流型	参数 C
Chisholm ^[9]	气相-液相	C
	层流-层流	5
	层流-湍流	10
	湍流-层流	15
	湍流-湍流	20
Zheng ^[11]	波状流	$C = \left(0.014 \left(\frac{Re_g}{1000} \right)^2 - 0.001 Re_g + 27.78 \right) \left(-0.03 Re_l^2 + 0.19 \left(\frac{Re_l}{1000} \right) + 0.27 \right)$
	环状流	$C = 0.25 \left(\frac{Re_g}{1000} \right)^{2.07} \left(0.12 \left(0.02 \frac{Re_l}{1000} \right)^{17.98} + 0.22 \left(1 - 0.02 \frac{Re_l}{1000} \right)^{0.25} - 0.21 \right)$
	段塞流	$C = 1836.6 Re_g^{-0.236} Re_l^{-0.384}$
Zhang ^[12]	间歇性流动	$C = \left(\frac{Re_g}{Re_l} \right)^{0.88} \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.83}$
	环状流	$C = \left(\frac{Re_g}{Re_l} \right)^{1.10} \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.98}$

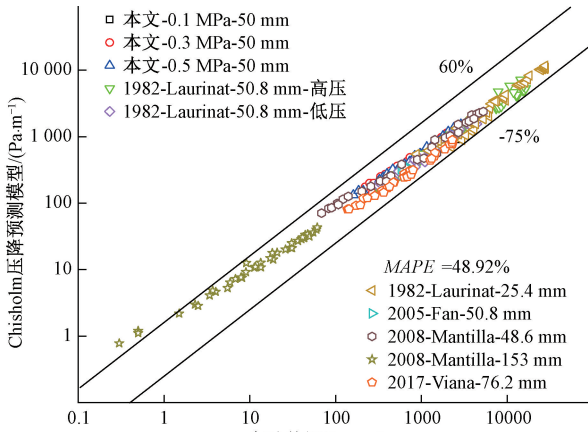
$$e = \frac{x_{corr} - x_{exp}}{x_{exp}} \times 100\% \quad (11)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{x_{corr,i} - x_{exp,i}}{x_{exp,i}} \right| \times 100\% \quad (12)$$

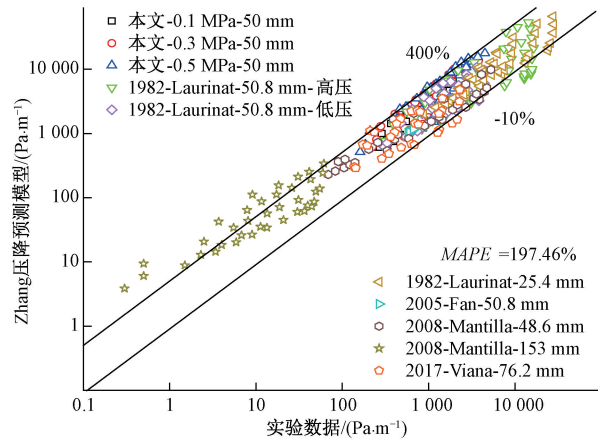
其中, x_{exp} 为实验测量值, x_{corr} 为模型预测值, N 是工况条件的数量, i 是第 i 个工况条件。

图 5 (a) 所示的 Chisholm 模型为分相模型, 虽然该模型预测值整体相对集中, 但其 MAPE 值为 48.92%, 这是由于该模型为常压下压降预测模型, 而部分实验数据为中高压条件下压降数据, 导致该模型的预测值偏小, 从而产生较大的实验误差。

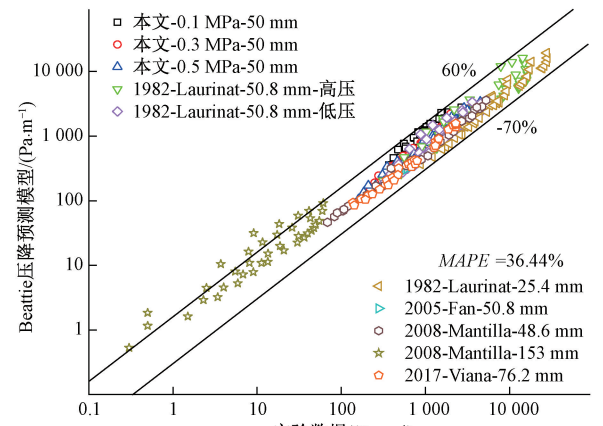
图 5 (b) 中 Zhang 等^[12] 改进了 Chisholm 模型, 对其中的 Chisholm 参数进行重新拟合, 该压降的拟合模型和



(a) Chisholm模型预测结果
(a) Chisholm model predictions



(b) Zhang模型预测结果
(b) Zhangmodel predictions



(c) Beattie模型预测结果
(c) Beattiemodel predictions

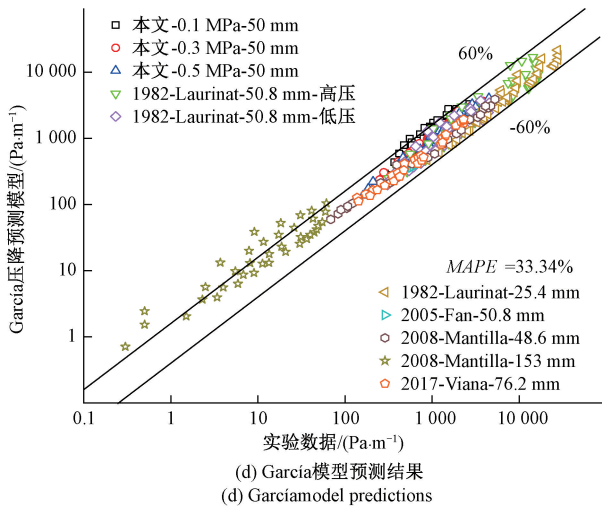


图 5 前人关系式对比

Fig. 5 Comparison chart of previous relationships

实验结果的对比并不理想,其预测值整体偏大,其原因在于该模型基于 3.12 mm 高温绝热管道流动数据拟合得到压降模型,小管道内流动时,压力会相对较大,致使摩擦压降也随之较大,导致其对于 50 mm 管道的模型预测值偏差较大。同时,这也表明了 Chisholm 公式的局限性,其对于压降的判断依赖流动形态以及流动条件。

Beattie 模型与 García 模型均为均相模型,拟合结果分别如图 5(c) 和 (d) 所示。从图形中可以看出,Beattie 模型的误差分布在 -70% ~ 60%,其 MAPE 为 36.44%; García 模型的误差区间为 -60% ~ 60%,该模型的 MAPE 值为 33.34%,与其他两个模型相比,二者的 MAPE 值相对较小,这表明均相模型相对较好的预测性能。同时, García 模型在 4 个模型中预测误差最小,这是由于 García 模型由于在拟合过程中代入了大量不同管径和不同黏度的实验数据,因此模型的适用范围更加广阔。但是实验数据均为常压条件下的实验数据,对于中高压、大管径条件下的预测效果并不理想。

通过上述对于压降预测模型的分析,目前存在的问题主要有两方面。一方面,在中高压、大管径条件下,现有模型的预测效果均不理想,这是由于实验条件的限制,以及在模型拟合过程中没有考虑管道压力等影响参数。另一方面,现有模型大多需要进行流型判别,而对于无需流型判别的均相模型,通常其预测误差会相对较大,因而缺少一个通用且预测准确的压降模型。为了解决上述问题,本文基于均相模型进行改进,借鉴 García 的研究思路,带入大量不同流型的实验数据,同时引入压力和管径因素,建立了一个新的压降预测模型。

3.2 模型参数选择

上述 4 个模型中均考虑了 Re 对于压降的影响,这是

由于两方面的因素:首先, Re 包含黏度因素,对于不同的流体,其黏度不同,可以通过 Re 进行反映^[21]。其次, Re 也是判别流动特征的依据,不同的 Re 代表不同的流型,这对于需要进行流型判别的模型至关重要。此外,本文针对水平管道气液两相环状流开展实验研究,而重力因素会影响管道内环状流的形态,导致管道上半部分液膜不对称,从而改变液-壁接触面积,使得液-壁间剪切力发生变化,进而影响管道内压降,因此通过添加弗劳德数 (Froude number, Fr) 引入重力对于管道内压降的影响。此外,随着管径的减小,表面张力作用将逐步增强^[22],即使在相同流速下,对于不同管径,气液两相流的流型也并不相同,从而导致气体、液体和管壁的接触面不同,致使表面张力影响流动情况有所不同。而韦伯数 (Weber number, We) 能很好的反映出表面张力对压降变化的影响,引入 We 能够增加模型的预测范围,提高模型的准确性。

为了评价各参数相关性,绘制了各参数热力图,如图 6 所示。其中 We 与 Fr 的影响因素占比较多, Re 的影响相对较小。同时,图中混合参数 Re_m 、 Fr_m 、 We_m 的相关性比单相参数的相关性要更高,混合参数融合了气液两相的流动特性,更能反应压降的变化规律。因此,本文选取 Re_m 、 Fr_m 和 We_m 作为压降预测模型的内部参数,其计算公式如下:

$$Re_m = \frac{D\rho_m u_m}{\mu_m} \quad (13)$$

$$Fr_m = \frac{u_m}{\sqrt{gD}} \quad (14)$$

$$We_m = \frac{D\rho_m u_m^2}{z} \quad (15)$$

其中, z 是表面张力。

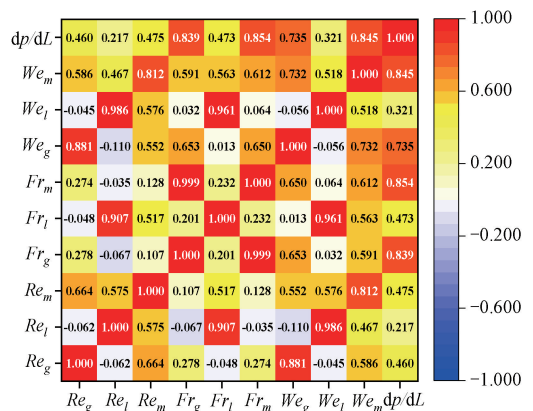


图 6 各参数热力

Fig. 6 Heat maps for each parameter

3.3 新模型建立

基于上述的参数选择,同时参考 García 模型的研究

思路,建立了新的气液两相流压降预测的模型,如下所示:

$$f_m = a \times Re_m^b \times Fr_m^c \times We_m^d \times \left(\frac{P}{P_{ref}}\right)^e \quad (16)$$

其中, a 、 b 、 c 、 d 、 e 为拟合参数, P_{ref} 为参考压力,其值等于 0.1 MPa。

将所得的摩擦系数通过 Fanning 方程(式(8))进行压降的求解。为了得到式(16)中的拟合系数,采用非线性最小二乘法 Levenberg-Marquardt 迭代算法对压降预测模型进行拟合。将实验数据带入进行训练和优化,得到系数 $a=0.5354$, $b=-0.5151$, $c=0.2251$, $d=0.1023$, $e=0.3334$ 从而得到了压降的新关系式。模型拟合结果与本文实验结果对比如图 7 所示,可以看出两者之间的 MAPE 为 7.16%,且 92% 以上的压降预测结果的相对误差 e 在 $\pm 25\%$ 以内,拟合效果良好。

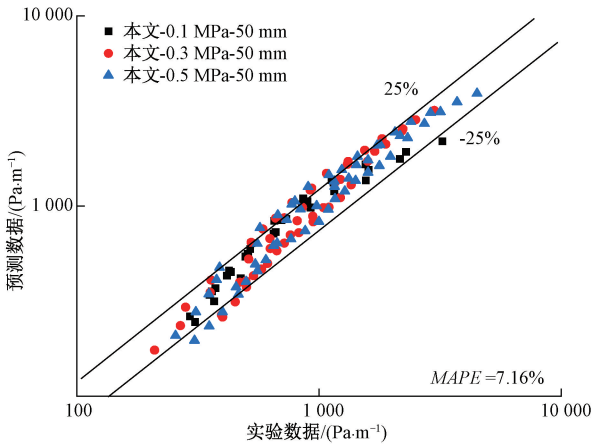


图 7 实验数据拟合结果

Fig. 7 Experimental data fitting result graph

为了进一步验证模型的适用性和外推性,将新模型与现有的压降实验数据库进行对比,如图 8 所示。

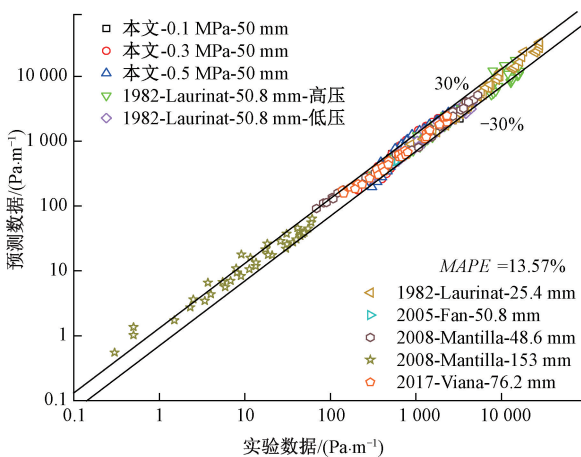


图 8 前人数据对比

Fig. 8 Comparison chart of previous data

由图可知,新的压降预测模型与已有的实验数据的 MAPE 为 13.57%,且保证了 93% 以上的压降预测结果的相对误差落在 $\pm 30\%$ 以内,预测误差相比于前人模型明显缩小,说明了新压降预测模型具有良好的外推性。综上,本文提出的新压降模型不仅考虑了不同流型、压力和管径因素对压降的影响,同时使用的计算参数大大减少,计算过程相对简单,总体压降预测效果较好,新模型具有相对广泛的适用性和外推性。

4 结 论

本文研究了中高压条件下水平气液两相流压降,通过实验得到了管道压力对压降的影响规律,并推导出环状流压降预测模型。本文结论如下:

1) 利用压降测量系统测得 0.1~0.5 MPa 系统压力下的压降,并对其不同工况下的压降变化规律进行分析。随着气液表观流速的增大,压降也随之增大;随着系统压力的增加,压降也逐渐增加,且上升趋势更加快速。

2) 将实验结果与 4 种压降预测模型进行比较,并基于此提出了适用于不同流型、压力以及管径的压降预测模型。通过相关性分析,选取了 Re_m 、 Fr_m 、 We_m 作为压降的拟合参数。参考 García 模型的研究思路,提出一种改进的压降预测模型。该模型能较好的预测本文实验数据,预测结果的 MAPE 为 7.16%。将现有的实验数据代入新模型,93% 以上的实验数据落在 $\pm 30\%$ 的相对误差范围内,且 MAPE 为 13.57%,这表明改进后的模型具有良好的适用性和外推性。

参考文献

- [1] GUO W, LIU CH P, WANG L, et al. Response of thermal diffusion to gas-liquid stratified/wave flow and its application in measurement [J]. Chemical Engineering Science, 2020, 225: 115789.
- [2] 刘晨昊,谷俊,田光雄,等. 航空发动机回油管路油气两相空隙率测量及温度补偿方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 214-220.
LIU CH H, GU J, TIAN G X, et al. Study on voidage measurement of gas-oil two-phase and its temperature compensation method in oil return tube of aeroengine [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 214-220.
- [3] 魏鹤鸣,侯林嵩,丁武成,等. 一种非接触式光学微腔液压力测量系统[J]. 电子测量技术, 2024, 47(7): 42-48.
WEI H M, HOU L S, DING W CH, et al. Non-contact optical microcavity liquid pressure measurement

- system[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(7): 42-48.
- [4] 赵宁,孙铭聪,刘苗苗,等. 一种测量液膜厚度的超声相控阵实验装置[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(3): 170-178.
ZHAO N, SUN M C, LIU M M, et al. Ultrasonic phased array experimental device for liquid film thickness measurement[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(3): 170-178.
- [5] 张瀚瑞,董峰,谭超. 液固两相流压降规律及超声法压降测量[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(10): 46-54.
ZHANG H R, DONG F, TAN CH. Liquid-solid two-phase flow pressure drop and ultrasound-based pressure drop measurement method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(10): 46-54.
- [6] WANG M, LIU J G, BAI Y X, et al. Flow rate measurement of gas-liquid annular flow through a combined multimodal ultrasonic and differential pressure sensor[J]. *Energy*, 2024, 288(1): 129852.
- [7] 于新国. Lockhart-Martinelli 两相流摩擦压降模型与典型均相模型的验证对比分析[J]. *制冷与空调*, 2024, 24(9): 29-33.
YU X G. Assessment of two-phase frictional models: Lockhart-Martinelli model and classic homogeneous models[J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2024, 24(9): 29-33.
- [8] LOCKHART R W, MARTINELLI R C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes[J]. *Chemical Engineering Progress*, 1949, 45(1): 39-48.
- [9] CHISHOLM D. A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1967, 10(12): 1767-1778.
- [10] KANG J H, ZHANG X Y, ZHANG D, et al. Pressure drops and mixture friction factor for gas-liquid two-phase transitional flows in a horizontal pipe at low gas flow rates[J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, 246: 117011.
- [11] ZHENG D D, SHAO S M, LIU AN N, et al. Study of the pressure drop prediction model of wet gas in horizontal pipe[C]. 2023 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2023: 36-41.
- [12] ZHANG J ZH, LEI L, CHENG CH, et al. Experimental investigations of gas-liquid two-phase flow in a horizontal mini pipe: Flow regime, void fraction, and frictional pressure drops[J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(1): 013333.
- [13] BEATTIE D R H, WHALLEY P B. A simple two-phase frictional pressure drop calculation method[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1982, 8(1): 83-87.
- [14] GARCÍA F, GARCÍA R, PADRINO J C, et al. Power law and composite power law friction factor correlations for laminar and turbulent gas-liquid flow in horizontal pipelines[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2003, 29(10): 1605-1624.
- [15] LAURINAT J E. Studies of the effects of pipe size on horizontal annular two-phase flows[D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1982.
- [16] FAN Y Q. An investigation of low liquid loading gas-liquid stratified flow in near-horizontal pipes[D]. Oklahoma: The University of Tulsa, 2005.
- [17] MANTILLA I. Mechanistic modeling of liquid entrainment in gas in horizontal pipes[D]. Oklahoma: The University of Tulsa, 2008.
- [18] VIANA F. Liquid entrainment in gas at high-pressures[D]. Oklahoma: The University of Tulsa, 2017.
- [19] 孙宏军,王伟,桂明洋. 水平管环状流液膜厚度与波动参数分布[J]. *化工学报*, 2019, 70(11): 4162-4171.
SUN H J, WANG W, GUI M Y. Distribution of liquid film thickness and wave parameters in horizontal annular flow[J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(11): 4162-4171.
- [20] 赵宁. 气液两相环状流流动参数的近红外测量[D]. 天津:天津大学, 2018.
ZHAO N. Measurement of flow parameter in gas-liquid two-phase annular flow based on near-infrared (NIR) technique[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [21] 夏赣民,李醒飞,刘帆. 气体对磁流体动力学传感器影响机理的探讨[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(4): 238-248.
XIA G M, LI X F, LIU F. Discussion on the influence mechanism of gas on magnetohydrodynamic sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(4): 238-248.
- [22] 娄文强,王志远,李鹏飞,等. 适用于全流型域全倾角范围的井筒漂移流关系[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(3): 605-615.
LOU W Q, WANG Z Y, LI P F, et al. Wellbore drift

flow relation suitable for full flow pattern domain and full dip range[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(3): 605-615.

作者简介



王蜜, 2022 年于天津大学获得博士学位, 现为河北大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为多相流测试技术与仪器。

E-mail: wangmi@hbu.edu.cn

Wang Mi received her Ph. D. degree in 2022 from Tianjin University. She is currently

a lecturer and master tutor at Hebei University. Her main research interests include multiphase flow measurement technology and instruments.



白雨铎, 2021 年于太原理工大学获得学士学位, 现为河北大学硕士研究生, 主要研究方向为流体流动参数检测与数值模拟。

E-mail: baiyuxin@stumail.hbu.edu.cn

Bai Yuxin received his B. Sc. degree in 2021 from Taiyuan University of Technology.

He is currently a M. Sc. Candidate at Hebei University. His main research interests include fluid flow parameter detection and numerical simulation.



董鹏(通信作者), 2012 年于石家庄机械化步兵学院获得学士学位, 现为河北大学电气工程实验师, 主要研究方向为流量检测技术与标准装置。

E-mail: dongpenghbu@126.com

Dong Peng(Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2012 from Shijiazhuang Mechanized Infantry Academy of the CPLA. He is currently an electrical engineering experimenter at Hebei University. His main research interests include flow detection technology and standard equipment.



方立德, 2008 年于天津大学获得博士学位, 现为河北大学教授、质量技术监督学院院长, 主要研究方向为热工参数计量与控制、多相流检测技术。

E-mail: fanglide@hbu.edu.cn

Fang Lide received his Ph. D. degree in 2008 from Tianjin University. He is currently a professor and the dean of College of Quality and Technical Supervision of Hebei University. His main research interests include the measurement and control of thermal parameters, multiphase flow detection technology.