

油气两相流流过弯管的局部阻力特性研究^{*}

郭烈锦 黄建春 郭纯斌
(西安交通大学, 710049, 西安) (国家地震局防灾技术高等专科学校)

摘要 以油气、气水为工质,对进口水平、出口垂直向上的90°弯管内气液两相流局部阻力特性进行了实验研究.弯管内径45 mm、弯曲半径为300 mm.根据实验结果,总结出了气水、油气两相流体流过弯管时的局部阻力变化规律,并与前人的结果进行了比较.重新提出了统一的弯管局部阻力计算公式,计算值和实验值符合良好.

关键词 弯管 局部阻力 油气两相流动

中国图书资料分类法分类号 TK2

Study of Local Pressure Drop Characteristics of Oil-Gas Two-Phase Flow through Bend

Guo Liejin Huang Jianchun Guo Chunbing
(Xi'an Jiaotong University, 710049, Xi'an) (College of Disaster Prevention Technology)

Abstract In this paper, an experimental study of local pressure drop characteristics of air-water and air-oil two-phase flow through horizontal inlet, vertical upward outlet 90° bend was conducted. The inner diameter of pipe is 45 mm, the radius of curvature of bend is 300 mm. Some comparisons between the experimental data and previous models or formulations and further analyses were made. Based on experimental results, a new kind of general empirical correlation for predicting local pressure drop of air-water and air-oil gas-liquid two-phase flow through bend was proposed. A good agreement was achieved between the experimental data and the new kind of general correlation.

Keywords bend local pressure drop oil-gas two-phase flow

符号表

| | | |
|--|--|---|
| A 弯管的横截面积 cm^2 | Δp_B 气液两相的局部阻力 Pa | α 截面相份额 |
| c, c_1, c_2 系数 | Δp_G 气相单独流过弯管时的局部阻力 Pa | β 体积相份额 |
| d 弯管内径 m | Δp_L 液相单独流过弯管时的局部阻力 Pa | μ 动力粘度 $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ |
| D 弯曲直径 m | R 弯曲半径($=D/2$) m | ρ 密度 kg/m^3 |
| g 重力加速度 m/s^2 | U_s 折算速度 m/s | φ 两相阻力因子 |
| G 质量流速 $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ | x 干度 | ($=\Delta p_B/\Delta p_L$) |
| L 管长 m | X_{tt} Martinelli 参数($=\Delta p_L/\Delta p_G$) | 或($\Delta p_B/\Delta p_{L0}$) |

收到日期:1997-07-08. 郭烈锦:男,1963年10月生,能源与动力工程学院动力工程多相流国家重点实验室,教授.

^{*}国家自然科学基金(59576040)与陕西省自然科学基金资助项目(95C03)

下标

B 弯头 L 液相 W 水 G 气相 L⁰ 全液相

气液两相流动阻力计算是两相流领域的重要研究课题之一,也是工业设计和设备选型的重要依据.弯管在管道输运及管道连接方面是不可缺少的,应用非常广泛,其内部流动也有许多特殊性^[1~3].在本世纪 30 年代,人们就利用弯管内流体流动特性来开发弯管流量计,并应用于单相流体流量的测量.随着工业发展和科学技术的进步,有关两相及三相流动的应用越来越多,管道流动压降的精确计算越来越重要.到目前为止,有关弯管内的气(汽)水两相局部阻力特性已有广泛的研究^[1,2,4,5],但有关油气两相流局部阻力特性的实验和理论研究至今未见报道.因此,有必要对弯管内的各种气液两相流的局部阻力特性做进一步的深入研究,得出准确、有效并且应用范围宽广的局部阻力计算公式与方法.

1 实验系统与装置

实验是在西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室的油气水三相流实验台上进行的.实验系统如图 1 所示,实验段是用内径为 45 mm 的无缝钢管加工而成的 90°弯管,其弯曲半径为 300 mm.

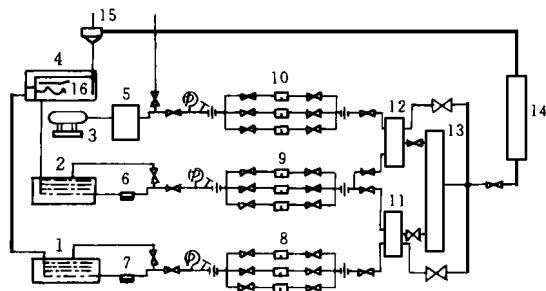


图 1 实验系统示意图

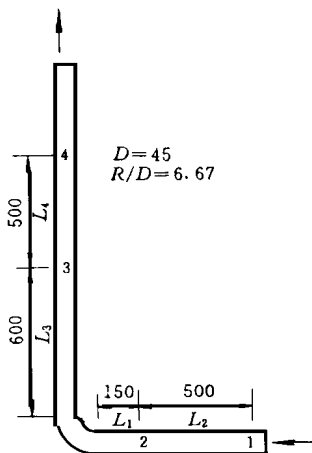
1:油箱; 2:水箱; 3:空压机; 4:油水分离器; 5:空气稳压器;
6:水泵; 7:油泵; 8:油路孔板流量计; 9:水路孔板流量计;
10:气路孔板流量计; 11:油水混合器; 12:油气混合器; 13:三相混合器; 14:实验段; 15:气液分离器; 16:波纹板组件

图 1 实验系统示意图

流体水平进入实验段,垂直向上流出.实验中,流量、压力、温度、压差等测量信号都利用 IMP 板引入 IBM/386DX 兼容机进行监视、记录.

实验中,为了测量到比较真实的两相流体流过弯管的局部阻力,沿流体流过弯管的方向依次布置了 4 个测压点,如图 2 所示,每个测压点处的横截面

上均匀地开了 8 个 3 mm 的取压小孔,取压小孔的外侧焊一均压环室,由导压管经平衡罐排除导压管



单位:mm

图 2 实验段结构

中的气体后与压力变送器 and 1151DP 电容式差压变送器相连,可分别测得进口压力 p_1 及各段的压差 Δp_{12} 、 Δp_{34} 、 Δp_{14} .采用等效压头法从测取的弯管及进出口影响区段的总压降 Δp_{14} 中减去直管段的总压降及弯管的重位压降,就得到气液两相流体流

过弯管时所引起的总的局部阻力损失 Δp_B .

$$\Delta p_B = \Delta p_{14} - \frac{L_1 + L_2}{L_2} \Delta p_{12} - \frac{L_3 + L_4}{L_4} \Delta p_{34} - \Delta p_{ZW} \quad (1)$$

由于本次实验中使用了注水的平衡罐,使得导压管中的工质密度与实验段中的工质密度不相等,因而弯管段的重位压降为

$$\Delta p_{ZW} = [\beta \rho_G - (1 - \beta) \rho_L] g R \quad (2)$$

实验的参数范围为:对气水两相而言,折算水速 $U_{sw} = 0.07 \sim 1.552$ m/s;折算气速 $U_{sg} = 0.34 \sim 20.95$ m/s;干度 $x = 0.002 \sim 0.070$.对油气两相而言,折算油速 $U_{so} = 0.03 \sim 0.70$ m/s;折算气速 $U_{sg} = 0.51 \sim 20.95$ m/s;干度 $x = 0.002 \sim 0.250$.

2 几种常用的弯管局部阻力压降计算模型或方法

在气液两相流阻力特性研究中,主要采用下述 3 种模型或方法来计算弯管局部阻力.

2.1 均相流动模型

假定气液两相流流过弯管时的局部阻力系数与单相相同,并认为两相流体混合均匀、两相间无相对滑移.此时两相流体流过弯管的局部阻力压降为

$$\Delta p_B = \xi_{L^0} \frac{G^2}{2 \rho_m} \quad (3)$$

其中 ρ_m 为均匀混合的两相流密度,按文献[4]所

给的计算式计算; ξ_{L0} 为全液相局部阻力系数, 按文献[6]所给的计算式计算。

对式(3)两边同时除以 Δp_{L0} , 即得到均相模型下两相流弯管局部阻力压降的计算式

$$\frac{\Delta p_B}{\Delta p_{L0}} = 1 + x \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right) \quad (4)$$

2.2 分相流动模型

假定气液两相流在弯管内作分离流动, 气相为不可压缩流体, 流动过程中工质不发生附加蒸发, 截面含气率不变, 气相和液相单独流过弯管时的局部阻力系数相同; 气液两相流同时流过弯管时两相的分相压降相同, 并等于气液两相混合物流过弯管时的压降 Δp_B ; 气相和液相单相流过弯管时的局部阻力系数相同。

根据以上假设及 $A = A_G + A_L$, 文献[5]通过严格推导得出

$$(\Delta p_B / \Delta p_G)^{1/2} = (\Delta p_L / \Delta p_G)^{1/2} + 1 \quad (5)$$

上式两边同时乘以 $(\Delta p_B / \Delta p_{L0})^{1/2}$, 可得

$$(\Delta p_B / \Delta p_{L0})^{1/2} = 1 + x \left[\left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (6)$$

式(5)、(6)即为分相模型的弯管两相局部阻力压降计算式的2种表达形式。

2.3 Chisholm 的半经验、半理论模型

Chisholm^[7]根据气(汽)液两相流体流过弯管的压力分布, 提出弯管局部阻力损失由两部分组成, 一部分是在纯弯曲段内发生, 因弯管内的旋涡流和截面上的流场变化而引起, 可近似按均相流动模型来计算; 另一部分则是由于两相流体流过弯管时产生的分离效应导致滑动比发生变化, 而后又在弯管下游部分恢复到直管内的流动状况所引起的, 可用分相流动模型来计算。Chisholm 由此得到如下计算公式

$$\varphi_{L0}^2 = \frac{\Delta p_B}{\Delta p_{L0}} = 1 + \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right) [B' x (1 - x) + x^2] \quad (7)$$

式中 B' 为常数, 按文献[6~8]所给的计算式计算而得; Δp_{L0} 为全液相局部阻力, 按文献[5]所给的计算式求得。

3 实验结果与分析

3.1 本文采用的实验数据处理方法

作者在利用上述模型计算气水、油气两相流体流过弯管的局部阻力压降时发现, 3种方法都与实

验数据存在较大差距, 更重要的是它们都不能同时有效地将气水、油气2种两相流的实验数据所表现出来的规律以统一的形式整理出来。显然, 需要寻找更合适的模型或方法。众所周知, 在气液两相流研究中, 人们通常习惯使用 Lockhart-Martinelli 参数 X_{tt} 和两相摩擦阻力折算因子 φ_G 来整理数据^[9], 但同时也发现 φ_G 与 X_{tt} 在较宽广的参数范围内并非线性或单函数关系, 也不能明显地反映实验压力对阻力特性的影响。为此, Chisholm 曾在整理直管摩擦阻力数据时提出如下以 Lockhart-Martinelli 参数方法为基础并加以修正的 Chisholm 关联式

$$\varphi_L^2 = 1 + \frac{c}{X_{tt}} + \frac{1}{X_{tt}^2} \quad (8)$$

$$c = \left[c_1 + (c_2 - 1) \left(\frac{\rho_{Gm} + 0.05}{\rho_L} \right) \right] \cdot \left[\left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.5} + \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5} \right] \quad (9)$$

式中 c_1 、 c_2 为待定常数。

对式(8)两边同时乘以 $(\Delta p_G / \Delta p_{L0})^{1/2}$ 后, 再同时开方, 可转换为以 φ_{L0} 、 x 为参数的形式

$$\varphi_{L0} = (\Delta p_B / \Delta p_{L0})^{1/2} = [1 - x]^{1.75} + c(1 - x)^{0.875} x^{0.875} \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.375} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.125} + x^{1.75} \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.75} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.25}]^{0.5} \quad (10)$$

这就可以方便地同式(4)、(6)和(7)进行比较。

3.2 空气-水两相流

根据上述的处理方法, 通过对空气-水两相流的实验数据进行整理, 可以得到式(9)中的系数 c_1 、 c_2

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= 1 \\ c_2 &= 1 + 150 / (L/D) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由式(8)、(9)、(11)联立求得两相阻力倍率 φ_L^2 , 该计算值与实验的最大偏差在 20% 以内。

3.3 空气-油两相流

用同样的方法, 对空气-油两相流, 可以得到式(9)中的系数 c_1 、 c_2 为

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= 1 \\ c_2 &= 1 + 25 / (L/D) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

由式(8)、(9)、(12)联立求得两相阻力倍率 φ_L^2 , 该计算值与实验值的最大偏差在 18% 以内。其中式(11)、(12)中的 L/D 为弯管的当量长度。由 Churchill^[3]所推荐的公式计算

$$L/D = 1.249 \ 63 \times 10^{-4} (R/D)^8 - 5.886 \times 10^{-3} (R/D)^7 + 0.117155 (R/D)^6 -$$

$$1.28073(R/D)^5 + 8.36847(R/D)^4 - 33.3258(R/D)^3 + 79.1471(R/D)^2 - 102.565(R/D) + 67.7579 \quad (13)$$

3.4 实验结果与各种模型及本文关联式的比较

前面我们曾介绍了3种模型计算式.为检验本文实验数据与这3种模型计算式的符合程度,在图3、图4中将实验值标在以 φ_{L0} 及 x 为坐标的图中,对这3种模型计算式及本文实验所得关联式的计算结果进行了比较.

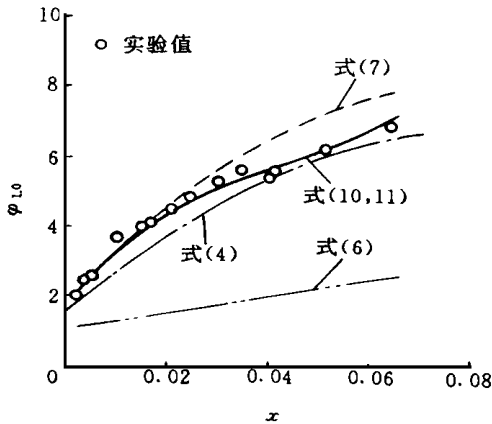


图3 气水两相的实验结果与其他计算式的比较

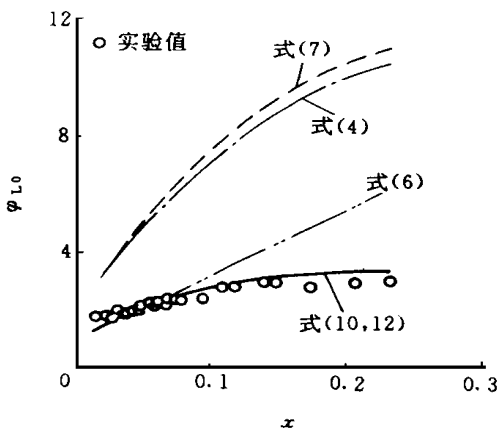


图4 油气两相的实验结果与其它计算式的比较

由图3可知,对气水两相流,在 $x \leq 0.03$ 时,实验值和Chisholm模型的计算值符合良好;在 $x \geq 0.03$ 时,实验值随 x 的增大越来越偏离Chisholm模型式(7)的计算值,而接近于均相模型式(4)的计算值,并且总是远远大于分相模型式(6)的计算值.在整个实验范围内,实验值与本文所得关联式(10)、(11)的计算结果符合良好.

由图4可知,对油气两相流,实验值不仅比Chisholm模型式(7)的计算值和均相模型式(4)的计算值小得多,而且,甚至在 $x \leq 0.06$ 时,比分相模型式(6)的计算值还要小.与气水两相流体流过弯管

的局部阻力特性相比较,这一现象说明了气液两相流体流过弯管时,当两相流体的动力粘性系数 μ 相差较大时会引起局部阻力特性的很大变化.在整个实验范围内,实验值与本文所得关联式(10)、(12)的计算结果符合良好.

4 结论

本文对水平进口、垂直向上出口的 90° 弯管内气液两相流的局部阻力特性进行了实验研究,并与其它3种模型进行了比较.结果表明:气液两相流体流过弯管时,流动状态既非完全是均相流动,也非完全是分相流动.3种常用模型计算式在计算气液两相流体流过弯管的局部阻力压降时都有一定的缺陷,特别是当气液两相流体的动力粘性系数相差较大时则更加明显,而利用本文提出的处理方法能很好地将气水及油气两相流体流过弯管的局部阻力压降的数据用统一的形式关联起来.

参考文献

- 1 Chisholm D. Brief communications of two-phase flow in bends. *Int J Multiphase Flow*, 1980, 6(2): 363~367
- 2 赵剑云.气液两相流体流过孔板和弯管的局部阻力损失的研究.[硕士学位论文].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,1989
- 3 Churchill S W. Friction equation spans all flow regimes. *Chem Engng*, 1977, 84: 91~92
- 4 郭烈锦,李广军,陈学俊等.卧式螺旋管内油气两相流流型的研究. *工程热物理论*, 1996, 17(4): 472~476
- 5 林宗虎.管道内气液两相流特性及其工程应用.西安:西安交通大学出版社,1992
- 6 黄建春.油气水三相流流过弯管的局部阻力特性研究:[硕士学位论文].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,1997
- 7 陈学俊,陈立勋,周芳德.气液两相流与传热基础.北京:科学出版社,1995
- 8 Chisholm D. Two-phase flow in pipelines and heat exchangers. New York: George Godwin, 1983
- 9 Lockhart R W, Martinelli R C. Proposed correlation of data for isothermal two-component flow in pipes. *Chem Engng Prog*, 1949, 45(1): 39~48

(编辑 蒋慧姝)