

水平圆管内油气水三相流摩擦阻力特性的实验研究

张西民, 郭烈锦, 于立军, 李广军, 黄建春
(西安交通大学, 710049, 西安)

摘要: 给出了水平放置的圆管内气水、油气两相流及油气水三相流动摩擦阻力压降特性的实验结果. 应用理论研究中推导出的各种流型下的摩擦阻力压降关联式进行了计算, 并与实验数据进行了比较, 揭示了摩擦阻力压降随折算气速、折算液速、油水混合液中的含水率以及管子直径的变化规律.

关键词: 油气水三相流; 摩擦阻力; 水平圆管; 实验研究

中国图书资料分类法分类号: TK2

Frictional Pressure Drop of Oil-Water-Air Three-Phase Flow in Horizontal Pipes

Zhang Ximin, Guo Liejin, Yu Lijun, Li Guangjun, Huan Jianchun
(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Frictional pressure drop characteristics are examined for oil-water two-phase flow and oil-water-air three-phase flow in two horizontal straight circular pipes. These test sections are 6 000 mm in length and made of steel. Their inner diameters are 25 mm and 45 mm. Based on theoretical and experimental results, satisfactory correlation relations are found.

Keywords: oil-water-air three-phase flow; frictional pressure drop; horizontal circular pipes; experimental measurement

1 实验系统与实验方法

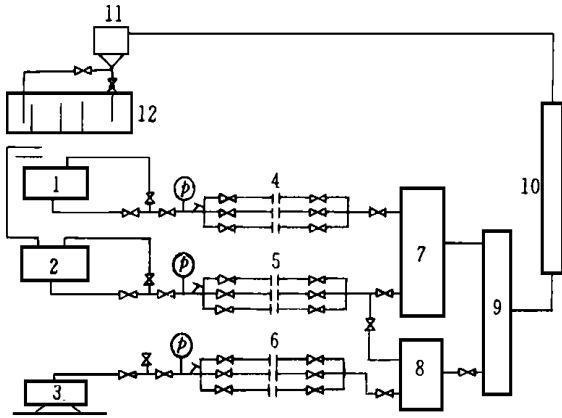
实验在西安交通大学多相流国家重点实验室的油气水砂多相流实验台上进行. 实验台结构如图 1 所示.

实验段为 $\phi 0.025$ m 和 $\phi 0.045$ m 两种管径、长

度为 6 m 的无缝钢管, 如图 2 所示. 在实验段上沿流动方向依次布置 4 个测点, 其中 1、2 分别为温度、压力测点, 3、4 为压降测点. 实验段下游有相应管径的有机玻璃管观察窗, 供流型观测用. 测量系统由 1151 电容差压传感器、CYB 型压力传感器、热电偶、流量孔板、IMP 采集板、数字化采集和计算机处理系统、D/A 转换器组成. 主要被测参数有温度、压力、摩擦阻力压降、流量和流型等.

收稿日期: 1998-01-07. 作者简介: 张西民, 男, 1957 年 9 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, 副教授.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59576040); 陕西省自然科学基金计划项目资助课题(95C03).



1: 油箱; 2: 水箱; 3: 空气压缩机; 4: 油路孔板; 5: 水路孔板; 6: 气路孔板; 7: 油水混合器; 8: 气水混合器; 9: 油气水混合器; 10: 实验段; 11: 气水分离器; 12: 油水分离器; P: 压力表; T: 热电偶
图1 实验系统图

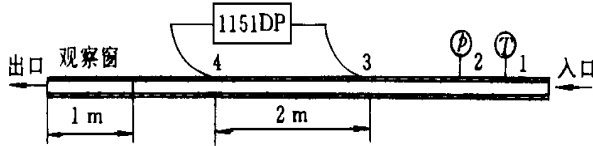


图2 实验段

实验系统安装好后,先进行水洗,清除系统中的沉积物.然后对各种传感器、流量孔板进行标定,对测量和数采系统进行调试.上述工作完成后,首先用单相水、单相油验证系统的可靠性.图3、4分别给出了单相水、单相油的摩擦阻力实验结果与尼古拉兹圆管中水力损失公式的比较,说明实验系统是可靠的.实验工质为46#机械油,其粘度为

$$\mu_o = 0.446865e^{-0.0609t} \quad (1)$$

其中 t 为油的温度; μ_o 为油的动力粘度, Pa·s.

油的密度 $\rho_o = 871.5 \text{ kg/m}^3$; 油与空气间的表面张力 $\sigma_{og} = 0.035 \text{ N/m}$. 上述参数计算式的适用范围为:绝对压力 $p = 0.12 \sim 0.5 \text{ MPa}$; 温度 $t = 6 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$. 整个实验研究包括油气、气水两相流动实验和在

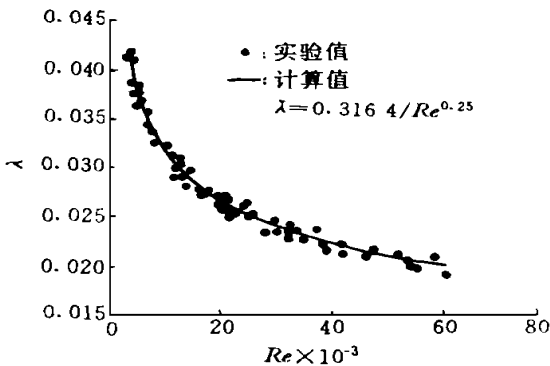


图3 单相水的摩擦阻力实验

5组不同油水质量比率(10%、20%、30%、40%、50%)情况下进行的油气水三相流动实验.

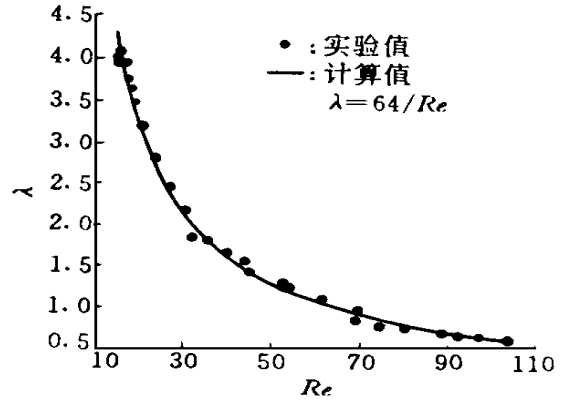


图4 单相油的摩擦阻力实验

2 油水乳化液物性参数的计算方法

在管内油气水三相流中,由于气相的剧烈扰动,油水混合物大多处于半乳化物状态,按其连续相和分散相的不同,可分为油包水(简称为W/O)和水包油(O/W)两种流态.人们对油水乳化液的界面特征已作了较多研究,但对处于半乳化物状态的油水混合物的界面特性却研究极少^[1~3]. 本文采用如下的油水混合物物性参数计算方法.

2.1 密度

由物理意义定义的水油乳化液密度为

$$\rho_l = (1 - \Psi_w) \rho_o + \Psi_w \rho_w \quad (2)$$

式中 Ψ_w 为含水率; ρ 为密度; 下标 o、w 分别指油和水.

2.2 粘度

大量实验结果表明,大多数情况下油水乳化液不遵循牛顿时摩擦定律,属于非牛顿流体,其粘度一般有表观粘度和有效粘度两种表达形式.由于有效粘度不仅与油水乳化液外相粘度、内相粘度、含水率、内相液珠的大小及乳化剂性质和数量等因素有关,还与实验本身的许多因素有关,确定非常困难.所以人们经常用表观粘度来表达油水乳化液的粘度.本文用式(3)进行计算,该式能很好地计算W/O型和O/W型油水乳化液的表观粘度.

$$\mu_l = \begin{cases} \frac{\mu_o}{1 - \Psi_w} \left(1 + \frac{1.5 \mu_w \Psi_w}{\mu_o + \mu_w} \right) & \text{数有 W/O} \\ \frac{\rho_o (1 - \Psi_w) + \rho_w \Psi_w}{\frac{\rho_o (1 - \Psi_w)}{\mu_o} + \frac{\rho_w \Psi_w}{\mu_w}} & \text{O/W} \end{cases} \quad (3)$$

式中 μ 为液体的动力粘度;下标 l、o、w 分别指油水混合液、油和水.

本文在实验研究中发现,式(3)中 O/W 型的转变界限 Ψ_{wc} 为

$$\Psi_{wc} = 0.5 \quad (4)$$

3 摩擦阻力压降的描述与实验结果

3.1 定义与数据处理方法

流体流过直管段的总压降包括摩擦压降、重力压降和加速压降 3 部分,其表达式为

$$- \frac{dp}{dx} = \frac{dp_f}{dx} + \frac{dp_g}{dx} + \frac{dp_c}{dx} \quad (5)$$

式中 $-dp/dx$ 为总压力降; dp_f/dx 为摩擦压降; dp_g/dx 为重位压降; dp_c/dx 为加速压降.

由于本实验段水平放置,混合物又处于近等温状态,加速压降在总压降中所占份额较小,重位压降和加速压降近似为 0.因此,总压降可以表示成

$$- \frac{dp}{dx} = \frac{dp_f}{dx} \quad (6)$$

因为水的物性参数比较稳定,且容易查取和计算,所以本文采取全水相摩擦压降倍率方法来整理实验数据,这样做不仅便于对摩擦阻力压降进行分析、比较,而且有利于工程应用.具体方法是:首先计算出与油气水三相总质量流速 G 相等的单相水即全水相摩擦阻力压降,其表达为

$$\left(\frac{dp_f}{dx}\right)_{TW} = \frac{4C_1}{D} \left(\frac{GD}{\mu_w}\right)^{-n} \frac{G^2}{2\rho_w} \quad (7)$$

其中: D 为管子直径, m; G 为油气水三相的总质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. 当水相处于层流时, $C_1=16$, $n=1.0$; 当水相为紊流时, $C=0.0791$, $n=0.25$.

再将气水、油气两相流动及油气水三相流动的总摩擦阻力压降与全水相摩擦阻力压降之比定义为全水相摩擦压降倍率,即

$$\Phi_{TW}^2 = \frac{dp_f/dx}{(dp_f/dx)_{TW}} \quad (8)$$

3.2 油气两相流摩擦阻力压降的研究结果

应用文[4]中的式(19)、(24)及(43)可分别算出油气两相流的分层流、泡状流及环状流的摩擦阻力压降或全水相摩擦压降倍率.将文[4]中的式(37)、(38)代入本文的式(8)中,可算出油气两相间歇流的摩擦阻力压降(下标 l 表示液相),文[4]的式(38)中的系数 B 为

$$B = 1.8892 - 0.00072\rho_l/\rho_o$$

图 5 示出了油气两相间歇流摩擦阻力压降的实验结果.图中的实验点为本实验所得数据,理论值为文[4]中(38)式的计算结果.从图可知,两者吻合良好.

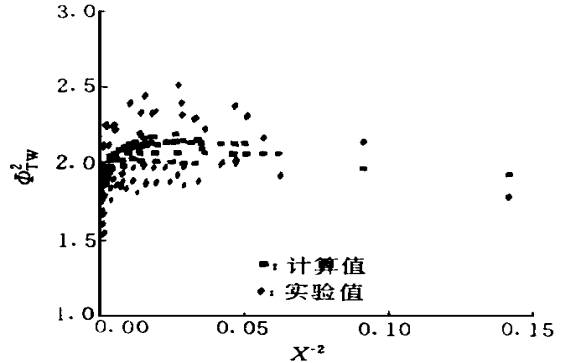
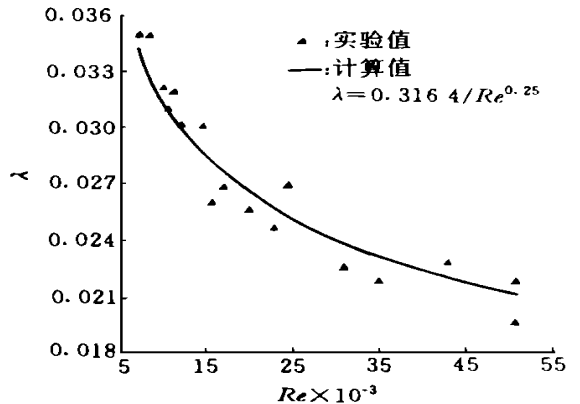


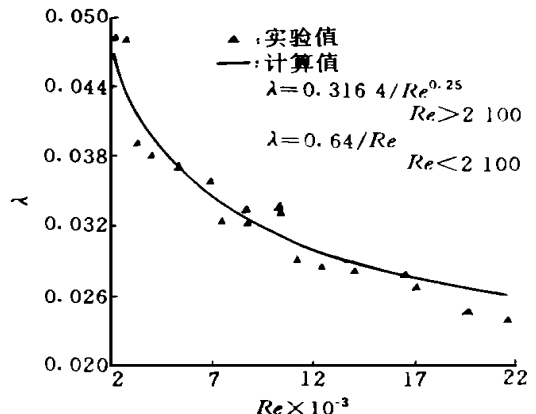
图 5 管径 45mm 的管内油气两相间歇流摩擦阻力压降

3.3 油水两相流摩擦阻力压降的研究结果

本文在内径为 45mm 水平放置的圆管实验段上,对含油率低于 50% (质量分数) 的油水混合液进行的实验研究结果如图 6 所示.图中的理论值由尼古拉兹公式计算得出.从图可知,两者吻合良好.



(a) 含油率 20%



(b) 含油率 50%

图 6 管径为 45 mm 的管内油水两相流摩擦阻力压降的实验结果

3.4 油气水三相流动摩擦阻力压降的研究结果

应用文[4]中的式(19)、(26)、(38)及(43),可分别计算出油气水三相流的分层流、泡状流、间歇流及环状流的摩擦阻力压降或全水相摩擦阻力压降倍率.文[4]的式(38)中的系数 B 为

$$B = 2.796 0 - 0.001 1 \rho_1 / \rho_g \quad (10)$$

图7给出了内径为45 mm、含油率(质量分数)为10%、20%、30%、40%、50%的油气水三相间歇流摩擦阻力压降的实验结果.从图7中可以看到,随着含油率、折算气速和折算液速的增加,三相流全水相摩擦压降倍率也增大.图8给出了间歇流、环状流及泡状流摩擦阻力压降的实验值与本模型计算结果的比较.从图8可知,两者吻合良好.

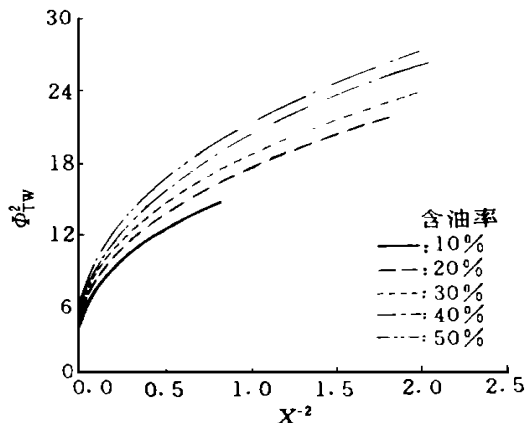


图7 管径为45 mm的管内油气水三相间歇流的全水相摩擦阻力压降倍率

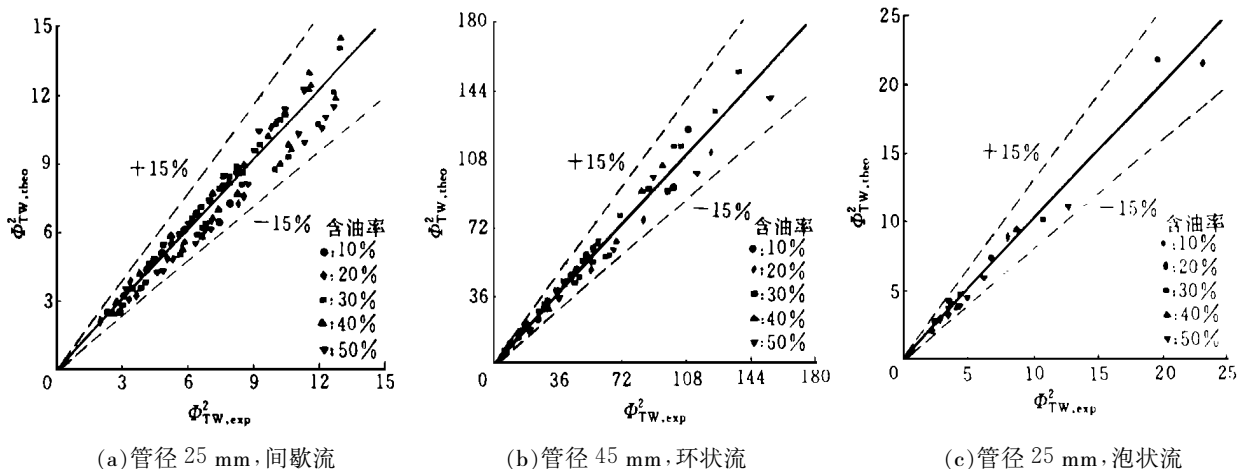


图8 管内油气水三相流全水相摩擦压降倍率的实验值和理论值的比较

4 结论

(1)本文报道了水平管内油气水三相流摩擦阻力压降特性的实验研究结果,并与文[4]中在双流体模型基础上按流型给出的理论计算式进行了比较,二者取得了良好的一致性.

(2)折算气速、折算液速和含油率是影响水平管内油气水三相流摩擦阻力压降的重要因素.随折算气速、折算液速和含油率的增加,三相流摩擦阻力压降也增大.

(3)管径对水平管内油气水三相流摩擦阻力压降也有较大影响.

参考文献:

- [1] Hewitt G F, Khor S K, Pan L. Three-phase gas-liquid flow: flow pattern, holdups and pressure drop. In: Proc of Int Symp on Multiphase Flow. Beijing: International Academic Publishers, 1997. 1~19.
- [2] 王树众. 管路内油气两相流的流动特性及其稳态计算程序的研制:[博士学位论文]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 1996.
- [3] Arirachakaran S, Oglesby K D, Malinowsky M S, et al. An analysis of oil/water flow phenomena in horizontal pipes. In: SPE Proc of Production Operating Symp, SPE Paper 18836. Oklahoma, 1978.
- [4] 张西民,郭烈锦,于立军. 水平圆管内油气水三相流摩擦阻力模型与结构关系式. 西安交通大学学报, 1999, 33(1): 68~72.

(编辑 蒋慧姝)