

水平圆管内油气水三相流摩擦阻力的模型与结构关系式

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: 以双流体分相模型为基础, 对水平放置圆管内油气两相流及油气水三相流摩擦阻力压降的特性数理模型开展了系统的理论分析, 建立了各种流型下的摩擦阻力压降关联式, 揭示了摩擦阻力压降的变化规律.

关键词: 油气水三相流; 摩擦阻力; 水平圆管; 数理模型

中国图书资料分类法分类号: TK²

Mathematical Model and Constitutive Formulations for Frictional Pressure Drop of Oil-Water-Air Three-Phase Flow in Horizontal Pipes

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

Abstract: This work deals with a review of the relevant theoretical and experimental work for oil-gas, oil-water two-phase flow and oil-water-gas three-phase flow through horizontal straight tubes. Flow patterns of three-phase flow are then classified for horizontal straight circular tubes. Based on the two-phase two-fluid model, a series of simplified models for every flow pattern can be proposed while correlation for the predicting frictional pressure drops can be deduced. Constitutive formulations involving of void fraction, holdup, etc. are suggested.

Keywords: oil-water-gas three-phase flow; frictional pressure drop; horizontal circular pipes; mathematical model

符号表

A	截面积, m^2	Q	体积流量, m^3/s	σ	表面张力, N/m
D	直径, m	Re	雷诺数	τ	剪切力, N/m^2
E_g	泡状流-间歇流转换边 界处的截面含气率	S	湿周, m	ρ	密度, kg/m^3
f	摩擦阻力系数	t	温度, $^{\circ}C$	ρ_f	流动密度, kg/m^3
		U	体积流速, m/s	β	体积相分数或水平夹角

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 [中国知网 https://www.cnki.net](https://www.cnki.net)

基金项目: 国家自然科学基金项目(59576064); 陕西省自然科学研究计划项目(95C03).

G	质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	x	质量相分数	ψ	液相相分数
h_l	无量纲液位高度	X^2	Lockhart-Martinelli 参数	α	截面相分数
m	质量流量, kg/s	μ	动力粘度系数	λ	沿程阻力系数
p	压力, Pa	ν	运动粘度系数, kg/m^3	Φ_{TW}	全水相摩擦压降倍率

下标 o 油相; g 气相; w 水相; l 液相; m 混合相; so 折算油相;
sg 折算气相; sw 折算水相; sl 折算液相

石油在开采和输送过程中都以油气两相及油气水三相形式存在,流动十分复杂,研究工作十分困难.我国东部各大油田都已进入高含水开发期,东部近浅海及西部沙漠油田的开发规模越来越大,对油气水三相流的基本规律和混相输送技术研究的需要越来越显迫切^[1~5].1995年10月在意大利、1997年10月在北京召开的两届多相流国际学术会议上,国际著名学者、英国的 G.F.Hewitt 教授均以“油气水三相流”^[3]为题作大会主题报告,充分说明了该问题的学术意义.

1 文献综述

1.1 气液两相流动

气液两相流摩擦阻力是两相流研究的重要课题之一,也是工业设计和工业设备选型的重要依据.至今,有关水/水蒸气、水/空气等气液两相流的摩擦阻力特性已得到广泛研究.对油气两相流,国内外一些学者也做了不少工作,王树众等^[6]对此作了详细综述,并对油气混合物在内径为 26 mm 圆管内的水平、垂直上升和垂直下降 3 种流动进行了研究.郭烈锦等^[5,7]对卧式及立式螺旋管内油气两相流型及摩擦阻力特性进行了研究.

1.2 油水两相流动

管内油气水三相流动中,由于气相的扰动,油水混合物处于半乳化状态.油水乳化液按其连续相和分散相的不同,可分为油包水(简记为 W/O)和水包油(O/W)两种流态,其流动特性完全不同.因此,确定油水乳化液的状态和性质对研究油气水三相流动是十分重要的.陈家琅^[8]等都曾根据自己的实验给出了计算油水乳化液粘度的计算式.Arirachakaran 和 Brill 等^[9]假设油水均匀流动、两相间不存在相对速度,提出了一种油水混合物摩擦阻力压降的计算方法.Hall 和 Hewitt^[3]采用相似理论对油水分层流动进行研究,并与二维油水分层流动(无限宽平板之间流动的精确解)及三维油水分层流动的数值解进

行了比较.

1.3 油气水三相流动

1.3.1 流型研究 前人对油气水三相流流型的研究主要集中在水平管、垂直管、倾斜管和螺旋管.Acikgoz 等^[2]、Stapelberg 和 Mewes^[10]、于立军等^[4]对水平管内油气水三相流动的流型进行了研究,大致将流型分为分层流、波状流、塞状流、弹状流、泡状流和滴状流.陈宣政^[6]、郭烈锦^[5,7]分别研究了垂直管、螺旋管内油气水三相流型及其转变.

1.3.2 流动压降 Hewitt 等^[3]用分相流模型,从动量方程出发,对水平管内三相分层流的摩擦阻力压降进行了数值计算,得到良好的结果,但计算方程过于复杂.Stapelberg 等^[10]对管径分别为 23.8 mm 和 59.0 mm、长为 35 mm 的水平管内油气水三相间歇流摩擦阻力压降和液弹频率进行了实验研究,并假设油水均匀混合,选用液弹频率和液弹内的空隙度作为方程组的补充参数进行了计算.他们均未考虑复杂相界面引起的摩擦阻力与流型的密切关系.

1.3.3 物理模型 文献中提出的大量模型,大致可以分成 3 种类型,即均相模型、分相模型和双流体分相模型.Stapelberg 和 Mewes^[10]指出,前两种模型都没有考虑流型的影响,均匀混合相间无滑移的情况在实际中不多见,分相模型主要针对分层流动,应用范围很窄.因此,这两种模型不可能得到较大范围的应用.此外,各种模型所对应的结构关系式也无成熟的成果.

2 水平管内油气水三相流的基本方程

本文选用双流体模型,其基本方程包括连续性方程、动量方程和能量方程.

连续性方程

$$\frac{\partial(\rho_m A)}{\partial t} + \frac{\partial(GA)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

其中油气水三相流体的真实密度 ρ_m 和油水混合物的平均密度 ρ_f 分别为

$$\rho_m = \alpha_g \rho_g + (1 - \alpha_g) \rho_l \quad (2)$$

$$\rho_l = (1 - \psi_w) \rho_o + \psi_w \rho_w \quad (3)$$

动量方程

对水平管内油气水三相稳态流动来说,动量方程的简化形式为

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\tau_{BS}}{A} G^2 \frac{d}{dx} \left[\frac{x_g^2}{\rho_g \alpha_g} + \frac{(1-x_g)^2}{\rho_l (1-\alpha_g)} \right] \quad (4)$$

能量方程

水平管内油气水三相稳态流动的能量方程为

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{dE}{dx} + \frac{\rho_f G^2}{2} \frac{d}{dx} \left[\frac{x_g^3}{\rho_g^2 \alpha_g^2} + \frac{(1-x_g)^3}{\rho_l^2 (1-\alpha_g)^2} \right] \quad (5)$$

式中 ρ_f 为油气水三相混合物在双流体模型中的流动密度

$$\rho_f = \left(\frac{x_g}{\rho_g} + \frac{1-x_g}{\rho_l} \right)^{-1}_{\text{气}} \quad (6)$$

3 摩擦阻力压降的理论推导

3.1 截面含气率的计算式

准确计算截面含气率是摩擦阻力计算准确性的前提.由于截面含气率不仅受折算气速、折算液速、油水混合液中含水率及管子直径等多种因素的影响,而且受气、液间相对滑动的影响,很难由纯理论推出,目前只能通过实验方法得出.本文选用王树众等^[6]的实验验证了一组水平管内气液两相流截面含气率公式的计算结果.

3.1.1 分层流截面含气率的计算式 联立连续方程和动量方程,求得液膜的无量纲高度 \bar{h}_l .由分层流流动结构的几何关系,可得截面含液率 ϵ_l 为

$$\epsilon_l = \frac{\theta - \sin \theta}{2\pi} \quad (7)$$

其中 $\theta = 2 \cos^{-1}(1 - 2\bar{h}_l)$ (8)

将式(8)代入式(7),可知截面含液率 ϵ_l 是 \bar{h}_l 的单一函数.而截面含气率可表示成

$$\alpha = 1 - \epsilon_l \quad (9)$$

3.1.2 泡状流截面含气率的计算式 泡状流是一种比较稳定的流动,气相以离散气泡形式分布于连续相中,一般发生在液速较高、气速较低的情况.选用两相间有相对滑动的漂移流模型截面含气率计算式

$$\alpha_g = \frac{V_{sc}}{C_0 V_m + V_{d\beta}} \quad (10)$$

其中 C_0 为分布系数, $C_0 = 1.2$; $V_{d\beta}$ 为倾角 β 时的漂移速度

$$\left. \begin{aligned} V_{d\beta} &= V_d (\cos \beta)^{1/2} (1 + \sin \beta)^{0.6} \\ V_d &= 0.345 \left[g D \frac{(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \right]^{0.5} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

3.1.3 间歇流截面含气率的计算式

$$\alpha_g = \frac{x \rho_l}{C_0 [x \rho_l + (1-x) \rho_g] + \rho_l \rho_g U_{gu} / m} \quad (12)$$

式中 C_0 为常数, $C_0 = 1.2$; U_{gu} 为漂移速度

$$U_{gu} = 1.18 \left[\sigma g \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l^2} \right]^{0.25} \quad (13)$$

3.1.4 环状流截面含气率的计算式

果 $\left[1 + 12 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{1/3} (1 - \alpha_g^{0.5}) \right] (\beta_g - \alpha_g)^2 = \frac{Y \sin \beta + \frac{X^2}{(1 - \alpha_g)^3}}{\beta_g^2 \alpha_g^{2.5} (1 - \alpha_g)^3} \right]$ (14)

式中 β_g 为体积含气率; X^2 是 Lockhart-Martinelli 参数

$$X^2 = \frac{4C_1 \left(\frac{\rho_l U_{sl} D}{\mu_l} \right)^{-n} \frac{\rho_l U_{sl}^2}{2}}{4C_g \left(\frac{\rho_g U_{sg} D}{\mu_g} \right)^{-m} \frac{\rho_g U_{sg}^2}{2}} \quad (15)$$

$$Y = \frac{(\rho_l - \rho_g) g}{4C_g \left(\frac{\rho_g U_{sg} D}{\mu_g} \right)^{-m} \frac{\rho_g U_{sg}^2}{2}} \quad (16)$$

当液相处于层流时, $C_1 = 16$, $m = 1.0$; 当液相处于紊流时, $C_1 = 0.0791$, $m = 0.25$.

3.2 摩擦阻力压降计算式的基本形式

采用双流体模型将油气水三相流动简化成气液两相流动,假设单位管长的气液两相流中各相的摩擦阻力压降相等,且等于总摩擦阻力压降;同一截面上各相的压力相等.不同流型下气液两相流摩擦阻力压降计算式的基本形式如下.

3.2.1 分层流摩擦阻力压降 当液体和空气以非常低的速度流过管路时,会出现一种稳定分层流,此时气液两相流体完全分开流动,其气相、液相的动量方程为

$$-A_l \frac{dp}{dx} - \tau_l S_l + \tau_l S_i - \rho_l A_l g = 0 \quad (17)$$

$$-A_g \frac{dp}{dx} - \tau_g S_g - \tau_l S_i - \rho_g A_g g = 0 \quad (18)$$

式中 S_i 、 A 、 τ_i 分别为气液界面的湿周、接触面积和切应力.

由上面的假设得到

$$\left(\frac{dp}{dx} \right)_1 = \left(\frac{dp}{dx} \right)_g \sigma = \left(\frac{dp}{dx} \right)_g \sigma \quad (19)$$

引入无量纲参数,将方程简化成为

$$X^2 \frac{f_1 V_1^2 S_1}{f_{sl} A_1} - \frac{f_g V_g S_g}{f_{sg} A_g} - \frac{f_i}{f_{sg}} V_g^2 \left(\frac{S_i}{A_1} + \frac{S_i}{A_g} \right) = 0 \quad (20)$$

上面所用到的所有无量纲参数都是无量纲高度 $h_1 = h_1/D$ 的函数. 方程(20)和(9)中有 V_{sg} 、 V_{sl} 、 h_1 三个未知量,在给定 V_{sl} 、 V_{sg} 的情况下,将所有参数代入方程(20)中便可求得 h_1 ,将所得到的无量纲参数代入(17)或(18)方程中可以得出 $\left(\frac{dp}{dx}\right)_g$ 和 $\left(\frac{dp}{dx}\right)_1$,由方程(19)便可求出摩擦阻力压降.

3.2.2 泡状流摩擦阻力压降 在水平放置圆管内的气液两相泡状流动中,气泡多数集中在管子上部,管壁摩擦阻力压降主要是由液相造成的.泡状流的摩擦阻力压降可表示为

$$\frac{dp_f}{dx} = f_1 \frac{l}{D} \left(\frac{1}{2} \rho_1 U_m^2 \right) \quad (21)$$

式中 U_m 为三相混合物的速度

$$U_m = \frac{G}{\rho_f} \quad (22)$$

泡状流的连续相(液相)通常已进入紊流,所以有

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \frac{0.3164}{Re_1^{0.25}} \\ Re_1 &= \frac{\rho_1 U_m D}{\mu_1} \end{aligned} \right\} \text{分层} \quad (23)$$

将式(22)、(23)代入式(21)中,得

$$\frac{dp_f}{dx} = \frac{0.3164}{D} \left(\frac{\rho_1 G D}{\mu_1 \rho_f} \right)^{-0.25} \frac{\rho_1 U_m D}{2 \rho_f^2} \quad (24)$$

式中: ρ_f 是混合物流动密度,由式(6)求取.为应用方便,将上式写成全水相形式

$$\Phi_{TW}^2 = \left(\frac{\mu_1}{\mu_w} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_1}{\rho_w} \right)^{0.75} \left(\frac{\rho_w}{\rho_f} \right) \quad (25)$$

并将式(6)代入(25)中,得

$$\Phi_{TW}^2 = \left(\frac{\mu_1}{\mu_w} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_w}{\rho_1} \right) [1 + x_g \left(\frac{\rho_1}{\rho_g} - 1 \right)]^{1.75} \quad (26)$$

式(26)即为气液两相泡状流的全水相摩擦阻力压降倍率

3.2.3 间歇流摩擦阻力压降 间歇流是工业中常

见的一种结构最复杂的流型,流动极不稳定.在双流体分相模型中,间歇流摩擦压降梯度可表示成与“实际动压头”有关的形式,

$$\frac{dp_f}{dx} = C f_{in} \frac{1}{D} (\rho_g U_{sg} U_g + \rho_1 U_{sl} + U_1) \quad (27)$$

式中: C 为修正因子,由实验确定; f_{in} 是间歇流的摩擦阻力系数,在间歇流中与管子壁面接触的始终是液相,因而 f_{in} 可以用下式计算

$$\left. \begin{aligned} f_{in} &= \frac{0.3164}{Re_m^{0.25}} \\ Re_m &= \frac{\rho_1 U_m D}{\mu_1} \end{aligned} \right\} \text{计算} \quad (28)$$

将式(6)、(22)和(28)代入式(27)中,得

$$f_{in} = 0.3164 \left\{ \left[1 + x_g \left(\frac{\rho_1}{\rho_g} - 1 \right) \right] \frac{GD}{\mu_1} \right\}^{-0.25} \quad (29)$$

因为

$$\rho_g U_{sg} U_g = \rho_g \left(\frac{x_g G}{\rho_g} \right) \left(\frac{x_g G}{\rho_g \alpha_g} \right) = \frac{x_g^2 G^2}{\alpha_g \rho_g} \quad (30)$$

$$\rho_1 U_{sl} U_1 = \frac{(1-x_g)^2 G^2}{(1-\alpha_g) \rho_1} \quad (31)$$

将式(30)、(31)代入(27),得

$$\frac{dp_f}{dx} = C f_{in} \frac{1}{D} \frac{G^2}{2 \rho_1} \left[\frac{\rho_1 x_g}{\rho_g} + \frac{(1-x_g)^2}{(1-\alpha_g)} \right] \quad (32)$$

引入气相和液相的滑移比,有

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\alpha_g} &= 1 + S \left(\frac{1-x_g}{x_g} \right) \frac{\rho_g}{\rho_1} \\ \frac{1}{1-\alpha_g} &= 1 + \frac{1}{S} \left(\frac{x_g}{1-x_g} \right) \frac{\rho_1}{\rho_g} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

将式(33)代入式(32),并整理得到

$$\frac{dp_f}{dx} = C f_{in} \frac{1}{D} \frac{G^2}{2 \rho_1} \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_1}{\rho_g} - 1 \right) [B x_g (1-x_g) + x_g^2] \right\} \quad (34)$$

式中: B 为修正系数.对上式进一步简化,得到

$$\frac{dp_f}{dx} = f_{in} \frac{1}{D} \frac{G^2}{2 \rho_1} \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_1}{\rho_g} - 1 \right) [B x_g + x_g^2] \right\} \quad (35)$$

式中 B 为修正系数,由试验结果拟合得到.

将式(29)代入式(35),可以得到

$$\frac{dp_f}{dx} = \frac{0.1364}{D} \left\{ \left[1 + x_g \left(\frac{\rho_1}{\rho_g} - 1 \right) \right] \frac{GD}{\mu_1} \right\}^{-0.25} \frac{G^2}{2 \rho_1} \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_1}{\rho_g} - 1 \right) [B x_g + x_g^2] \right\} \quad (36)$$

假定液体在管内处于紊流,全水相摩擦阻力压降可以写成

$$\left(\frac{dp_f}{dx}\right)_{TW} = \frac{0.3164}{D} \left(\frac{GD}{\mu_w}\right)^{-0.25} \frac{G^2}{2\rho_w} \quad (37)$$

用式(36)除以式(37),得

$$\Phi_{TW}^2 = \left(\frac{\mu_l}{\mu_w}\right)^{0.25} \frac{\rho_g}{\rho_l} \left\{ \left[1 + x_g \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1\right) \right] \right\}^{-0.25} \frac{G^2}{2\rho_l} \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1\right) [Bx_g + x_g^2] \right\} \quad (38)$$

式中的修正系数 B 可以通过实验数据关联回归得出计算式.

3.2.4 环状流摩擦阻力压降 在水平管内气液两相环状流中,液相是以一定厚度液膜的形式沿壁面流动;气相则以气核形式在中心流动,并且夹带有小液滴.与管子壁面接触的始终是液相.假定环状流气芯不夹带液滴,则其摩擦阻力压降可表示成

$$\frac{dp_f}{dx} = \left(\frac{0.3164}{Re_l^{0.25}}\right) \frac{1}{D} \frac{\rho_l U_1^2}{2} \quad (39)$$

式中 Re_l 为液相当量雷诺数; ρ_l 、 U_1 分别为液相的密度和真实速度,

$$U_1 = \frac{U_{sg}}{(1 - \alpha_g)} \quad (40)$$

式中 α_g 为截面含气率,由式(14)计算.

将式(3)、(40)代入式(39),可以得到

$$\frac{dp_f}{dx} = \frac{0.3164}{D} \left[\frac{(1 - x_g)GD}{\mu_l} \right]^{-0.25} \frac{(1 - x_g)^2 G^2}{2\rho_l (1 - \alpha_g)^2} \quad (41)$$

此刻全水相摩擦阻力压降为

$$\left(\frac{dp_f}{dx}\right)_{TW} = \frac{0.3164}{D} \left(\frac{GD}{\mu_w}\right)^{-0.25} \frac{G^2}{2\rho_w} \quad (42)$$

将式(41)除以式(42),得

$$\Phi_{TW}^2 = \left(\frac{\mu_l}{\mu_w}\right)^{0.25} \frac{\rho_w}{\rho_l} \frac{(1 - x_g)^{1.75}}{(1 - \alpha_g)^2} \quad (43)$$

式(43)为气液两相环状流动的全水相摩擦阻力压降倍率.

4 总 结

本文以双流体模型为基础,详细地推导了水平管内气水、油气两相流动及油气水三相流动中各种流型的摩擦阻力压降,并按流型给出了其摩擦阻力压降计算式,同时给出了相应的截面含气率计算式.

参考文献:

- [1] 郭烈锦,李广军,陈学俊.卧式螺旋管内油-气-水三相流型的实验研究.西安交通大学学报,1997,31(4): 54~60.
- [2] Acikgoz M, Franca F, Lahey R T Jr. An experimental study of three-phase flow regimes. Int J Multiphase Flow, 1992, 18(3): 327~336.
- [3] Hewitt G F, Khor S K, Pan L. Three-phase gas-liquid-liquid flow: flow pattern, holdups and pressure drop. In: Proc of Int Symp on Multiphase Flow. Beijing: International Academic Publishers, 1997. 1~19.
- [4] 于立军.水平管内油气水三相流动特性研究:[硕士学位论文].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,1997.
- [5] 郭烈锦,李广军,陈学俊,等.卧式螺旋管内油-气两相流型的研究.工程热物理学报,1996,17(4): 472~476.
- [6] 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.
- [7] 李广军,郭烈锦,陈学俊,等.卧式螺旋管内气液(油气)两相流摩擦阻力特性研究.动力工程,1997,17(4): 28~32.
- [8] 陈家琅.石油气液两相管流.北京:中国石油出版社,1995.
- [9] 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.
- [10] Stapelberg H H, Mewes D. Pressure drop calculation in three-phase slug flow of water, oil, and air. International Chemical Engineering, 1994, 34(3): 295~314.

(编辑 蒋慧妹)