

# 油气混输系统的实验研究与实验模拟准则<sup>\*</sup>

吴应湘 郑之初 李东晖 劳力云 马艺馨

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 描述了油气混输系统的实验研究, 特别是多相流的流态、增压、计量系统的实验研究, 并用动力相似理论分析了油气混输两相管流实验模拟所需满足的相似参数, 提出了各种简化条件下的相似规律, 讨论了用水和空气的两相流动来模拟原油和天然气的两相流动的可靠性和提高实验精度的手段和方法。

**关键词** 两相流 相似性分析 实验模拟准则

**中图法分类号** TE832.3<sup>+</sup>1

## An Experimental Study and Simulation Principles of an Oil-Gas Multiphase Transportation System

Wu Yingxiang Zheng Zhichu Li Donghui Lao Liyun Ma Yixing

(Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** This paper presents an experimental study on the performance of an oil-gas multiphase transportation system, especially on the multiphase flow pattern, multiphase pumping and multiphase metering of the system. A dynamic similarity analysis is also made to deduce similarity parameters of the system and the similarity criteria under simplified conditions. The reliability and feasibility of the two-phase flow experiment on water and air to simulate oil and gas are discussed by using the similarity criteria.

**Key words** multiphase flow similarity analysis experimental simulation principle

### 1 引 言

随着海洋油气开采水下生产系统的提出, 长距离油气混输成为需迫切解决的问题。由于井口回压将随着管道长度的增加而增加, 油井产量随着管道长度的增加而下降, 因此要求在井口和管线系统中设置多相增压泵。同时因油井的产液是油气水混合物, 各油井的产量计量和运营监控最经济、方便的办法是通过混相流量计量。其次是管长增加, 管线系统不同位置将出现各种不同的流态, 并可能形成段塞。不同流态下各异的压降、阻力特性以及段塞的蔓延、积聚、加速对整个输送系统造成的急剧动力变化及可能对系统造成灾难性后果等问题促使人们进行多相输送系统的流动性能研究。从而使多相增压、混相计量和多相流特性成为水下生产系统三大关键技术问题。

\* 获中国科学院九五重大项目(KZ951-A1-405)、国家自然科学基金项目(59476041)和国家 863 海洋领域高技术青年基金(820-Q-013)支持

收稿日期: 1999-05-06

吴应湘 男 43 岁 研究员 博士

多相流动问题是一种很复杂的流动现象,其控制变量远远多于单相流动,对其进行理论分析、数值计算和实验研究都远比单相流动要复杂、困难得多(Kasturi, 1972)。多相增压、混相计量及其与之相关的多相流特性问题目前更是难以通过理论分析和数值计算的方法来解决,故不得不采用实验室模拟或现场试验测试来获取数据。实验模拟往往采用一定缩尺比例的实验装置,使用经济、方便、可视性好的实验介质来反映或体现客观实际情况或现象。对油气混输系统来说,如何在实验模拟中反映出多相流特性对多相增压泵和混相计量仪的影响?如何确定实验设备的尺度?如何确定实验介质与实际介质间的模拟关系?这些都是进行多相流实验模拟时必须回答和解决,但迄今尚未解决或尚未得到明确答案的问题。

为了较好地解决上述问题,本文介绍了将多相增压、混相计量、多相分离置于同一多相流实验系统进行综合研究的情况;讲述了在气液两相流流态、压降、增压、计量等方面的研究工作和部分研究结果;描述了对气液两相管道流动进行的相似性分析,得出了一些对两相流动的理论分析、数值计算和实验模拟都有指导意义的结果。

## 2 油气混输系统的实验研究

由于多相流动的复杂性,在实验室进行多相管流模拟成为掌握海底油气混输基本规律的主要手段。同时海底产液混输过程中,必须对混相液体进行增压和计量,使水下多相增压泵和多相计量仪的研制成为实施水下生产系统的关键技术。因此在进行多相管流实验模拟时应考虑多相泵和多相计量仪的发展,发展多相泵和多相计量仪技术时,需侧重于它们对多相流各种流态的适应性。为此设计了一套模拟油气混输系统的模拟实验装置(如图 1)。设备由全透明有

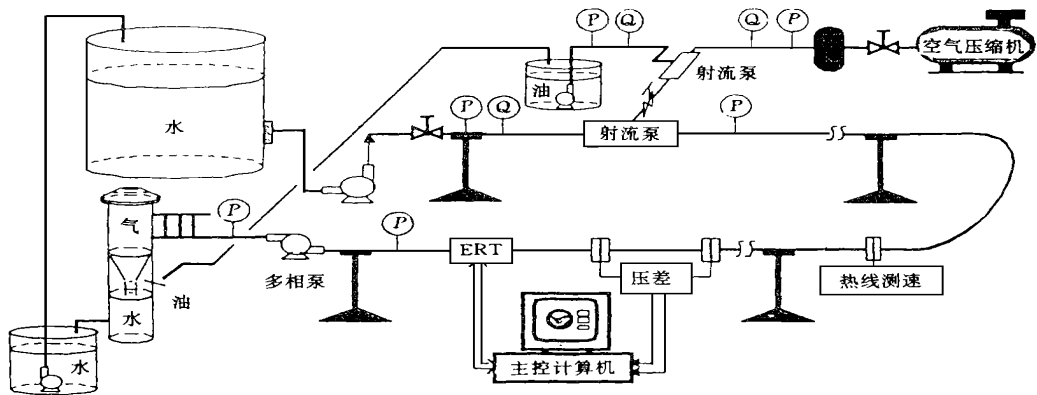


图 1 油气混输模拟实验系统

Fig 1 Oil-gas experimental simulation system

机玻璃制成,有效管长约 40m,管子内径 50mm。为验证系统的有效性,先用空气和水作为实验介质在该系统上进行气水两相流动的实验模拟。全水流情况下最大流速可达  $1.2\text{m/s}$ ,相应的  $Re = 6 \times 10^4$ ;全气流情况下气速可达  $5\text{m/s}$ ,相应的  $Re = 1.7 \times 10^4$ ;在气水两相并存的情况下,短时间内气流速度可达  $50\text{m/s}$  以上,相应的  $Re = 1.7 \times 10^5$ ,可以实现气水两相(1)层流与层流,(2)湍流与层流,(3)层流与湍流,(4)湍流与湍流四种状态下的管流实验。实验装置中还包

括增压泵系统,用以研究不同泵型对各种流态的适应性以及不同流态对泵性能、效率的影响;多相流界面层析成像系统,该系统既可用于流态的仿真和再现,配合分相测速装置,还可用于分相流量计量;多相分离器,用于油气水混合流体的分离和流速、流量、压力等的测量仪表。

## 2.1 多相流态、压降的实验模拟

流态是两相和多相流动的重要特征。以气水两相管流为例,水平管可出现气泡流、气柱流、分层流、波状流、团状流、环雾流和雾状流 7 种流态,垂直管可出现气泡流、液节流、搅拌流、环雾流和分束环雾流 5 种流态。要了解多相流动的实质首先必须对多相流的流态进行全面系统的了解和研究。为此,利用不同压为比和流量比下的气水或水气引射原理,采用两相引射方法,在多相流态仿真模拟装置上实现了水平和垂直管内管流的各种流态。从实验的结果看,流动图象的变化随气液流量的改变是一个连续过程,各种流态分界点的断定还是一个尚需解决的问题。即使在同一种流态下由于含气量的微小变化,流动图象也有差异,而流态的转换正是含气量以及气相和液相迁移速度逐步量变积累到一定程度才达到质变的过程。

因为管线的压降与流态密切相关,不同的流态有不同的管线压降。只有选用适合管内流态的压降计算方法,才能使计算结果符合实际情况,在管线油气混输中才能正确判定增压站的有无和确切数目。图 2 给出全水流、气泡流、段塞流和波状流压降测量结果的比较:全水流的平均压降为 935Pa,气泡流为 978Pa,段塞流 1 165Pa,波状流 2 030Pa,可见气泡流与全水流的压降相近,段塞流约为气泡流的 1.2 倍,波状流为气泡的 2 倍。所以准确判断流态并得到不同流态下的管线压降是油气输送管线设计的基础。

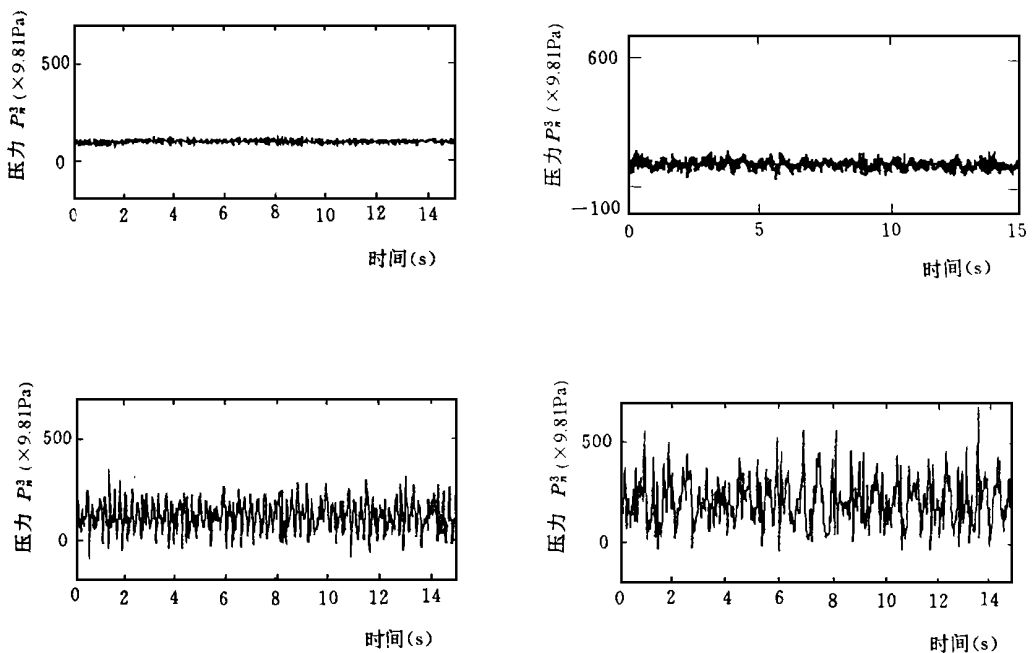


图 2 不同流态下压降随时间的变化

Fig 2 Temporary variation of pressure drop for various flow patterns

从严格的意义上说,任何流态沿管截面的压力分布都不是常数,而是逐点变化的。以最简单的定常分层流动为例,取双流体模型,忽略惯性项的影响,可得流动控制方程为:

$$\frac{1}{\gamma^2} \frac{\partial u_w}{\partial \xi} + \frac{\eta}{4} \frac{\partial u_w}{\partial \eta} + \frac{\eta}{4} \frac{\partial u_w}{\partial \eta} = \frac{dP/dz + \rho_L \cdot g \cdot \sin \alpha}{\mu_L} \frac{C^2}{(\cosh(\frac{1-\eta}{\eta}) - \cos(\pi + \gamma - \gamma\zeta))^2}$$

$$\times \frac{1}{(\pi - \gamma)^2} \frac{\partial u_G}{\partial \xi} + \frac{\eta}{4} \frac{\partial u_G}{\partial \eta} + \frac{\eta}{4} \frac{\partial u_G}{\partial \eta}$$

$$= \frac{dP/dz + \rho_G \cdot g \cdot \sin \alpha}{\mu_G} \frac{C^2}{(\cosh(\frac{1-\eta}{\eta}) - \cos(\gamma + \pi\zeta - \gamma\zeta))^2}$$

式中  $\xi, \eta$  与管截面坐标  $x, y$  的变换关系为:

$$x = \frac{C \cdot \sinh(\frac{1-\eta}{\eta})}{\cosh(\frac{1-\eta}{\eta}) - \cos(\gamma + \pi\zeta - \gamma\zeta)}, y = \frac{C \cdot \sin(\gamma + \pi\zeta - \gamma\zeta)}{\cosh(\frac{1-\eta}{\eta}) - \cos(\gamma + \pi\zeta - \gamma\zeta)}$$

$C = (D \cdot \sin \gamma) / 2$ , 为气液界面的半弦长,  $\gamma$  为界面的半圆心角,  $D$  是管道直径。数值求解上述方程, 可得沿管截面的等速线分布(见图 3)。计算条件为: 管道直径 25.4mm, 温度 25, 环境压力 0.1MPa, 流量比  $\mu_{L,S} = 0.1m/s$ ,  $u_{G,S} = 1m/s$

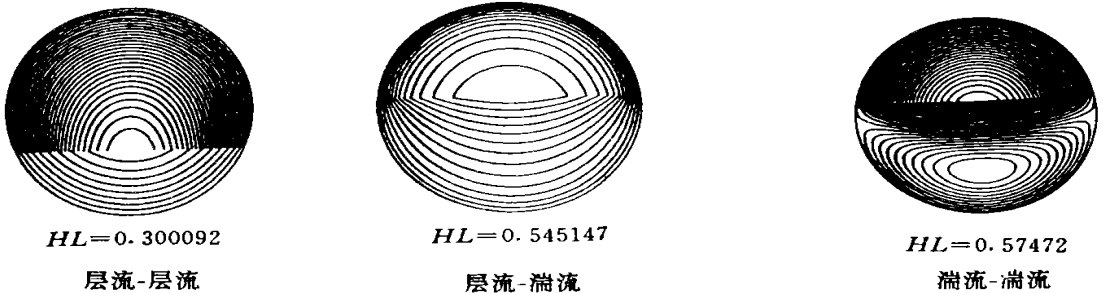


图 3 沿管截面不同流动状态的速度分布

Fig 3 Velocity distribution of various flow patterns in pipe sections

从计算结果看出,沿截面不同位置速度分布有明显的变化,同样压力分布也有明显的变化。为此,在实验的压降测量时,我们在管截面上布置了 4 个测点(如图 4)。

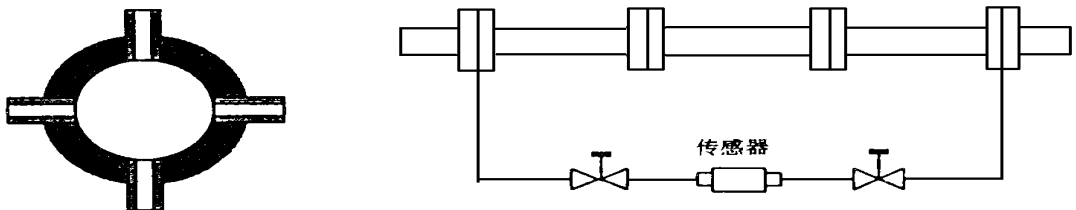


图 4 压降测量系统及传感器分布

Fig 4 Measuring system of pressure drop and distribution of sensors

对一波状流,我们测得各点的压降分布如图 5 所示: 截面顶点的平均压降为 1589Pa, 底点

为 2 040Pa, 左右两点分别为 1 893Pa 和 1 942Pa, 可见不同点的压降有明显的变化。因此, 要使管线的压降和阻力计算更为准确, 就必须考虑压力沿管截面的分布。

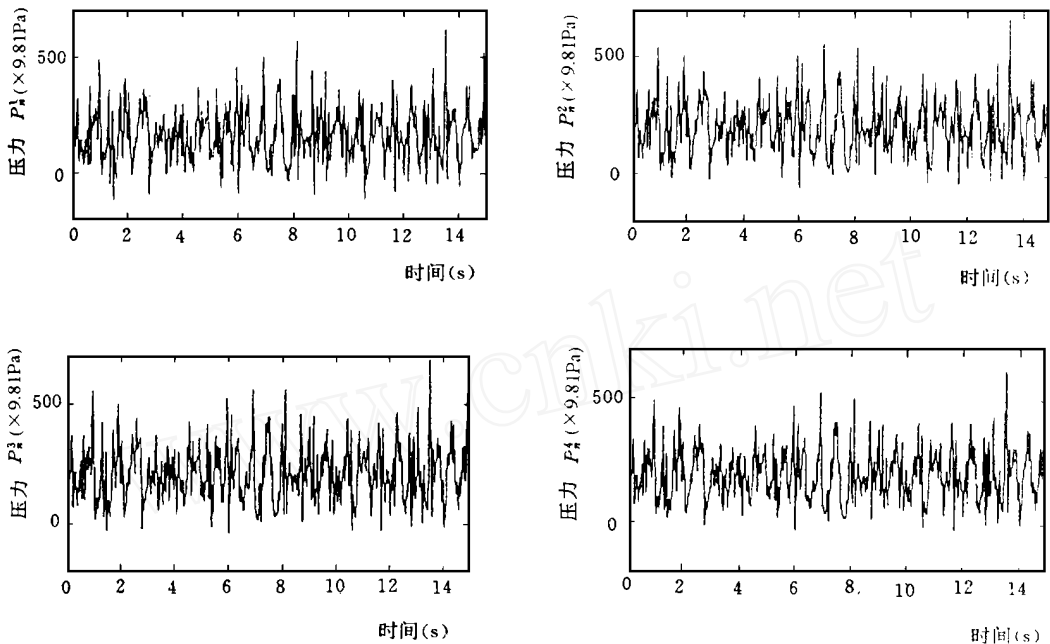


图5 管截面不同位置的压降变化

Fig. 5 Variation of pressure drop in various pipe sections

## 2.2 增压泵实验

为了考查增压泵在多相流各种流态下的性能, 在实验环路中设置了泵实验装置(如图1所示), 选用离心泵和射流泵作为研究对象。实验表明, 无驱动的射流泵随着引射气体压力的提高, 出口压力仅提高 2~3 倍, 所以射流泵的增压是不高的, 如在输送管线中采用多个引射泵增压, 加上无运转部件, 密封、材料寿命等问题容易解决, 这些优点使它仍不失为可用的增压手段之一。有驱动的离心泵的增压效果比射流泵高得多, 但混入大量气体的情况下增压效果将大大下降, 可为全水条件的 1/2 以下。

为了提高泵输效率, 目前正着手研究典型泵对各流态的最佳适应范围, 给出各种开采条件下适用的泵型和泵输系统, 进而研制一种可根据流动条件自动调节转速等的智能型泵, 以便适应绝大部分的流态范围和操作条件。

## 2.3 多相流界面测量及流量计量

混相流量计量也是水下生产系统的一项关键技术, 近年来国内外在这方面都有很大的发展, 但真正经济、实用的混相流量计尚不多见。经济、实用的混相流量计量的关键在于准确得到各分相的迁移速度和各分相所占比例, 因此各分相界面测量成为首先必须解决的问题。近年来兴起的一种无扰动、可视化在线测量技术- 层析成像技术可望用于解决这一问题。我们正将电阻层析成像方法用于多相流实验设备, 配合特定的算法和数值处理技术, 实现可视化界面测量。该方法与分相迁移速度测量的结合, 可望产生一种经济、实用的混相流量计量技术。

### 3 气液两相管流的相似性分析

假定管内气液两相都是Newton流体;气相满足完全气体的状态方程;气液相有明显的分界面;在分界面上满足:速度连续,切向应力连续,法向应力满足Laplace公式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_g}{\partial t} + (u_g \cdot \nabla) u_g &= \frac{k}{F} - \frac{\nabla(p\rho_g)}{\rho_g} + \frac{1}{Re_g \rho_g} \left[ \frac{1}{3} \nabla(\nabla \cdot u_g) + \Delta u_g \right] \\ \frac{\partial p_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g u_g) &= 0; \quad p_g/\rho_g = RT_c T/u_c^2 = ET \\ \frac{\partial u_l}{\partial t} + (u_l \cdot \nabla) u_l &= \frac{k}{F} - \nabla p + \frac{1}{Re_l} \Delta u_l; \quad \nabla \cdot u_l = 0; \quad \rho_l = 1 \\ \frac{\rho_g}{\rho_l} \left[ -p_g + \frac{2}{Re_g} \left( \frac{\partial v_g}{\partial z} - \frac{1}{3} \nabla \cdot u_g \right) \right] &= \frac{1}{W} \left[ \frac{1}{R_l} + \frac{1}{R_g} \right] \\ Q &= \lambda Q_g + (1 - \lambda) Q_l \end{aligned}$$

上述各方程中的量均为量纲一的量。参考值取为长度  $x_c$ , 速度  $u_c$ , 时间  $x_c/u_c$ , 气相密度  $\rho_{g0}$ , 液相密度  $\rho_l$ , 气相压力  $\rho_g u_c^2$ , 液相压力  $\rho_l u_c^2$ , 气相流量  $Q_{g0}$ , 液相流量  $Q_{l0}$ , 总流量  $Q_0 = Q_{g0} + Q_{l0}$ 。式中  $Re$  是 Reynolds 数,  $F$  是 Froude 数,  $E$  是 Euler 数,  $W$  是 Weber 数,  $R$  是气体常数, 下标  $g$  代表气相,  $l$  代表液相,  $k$  是沿重力方向的单位矢量。从以上各方程看出, 要使两个两相流动的流场相似, 除几何相似外, 还必须要:

$$\text{Froude 数相等 } (F = u_c^2/gx_c) \quad (1)$$

$$\text{气、液相 Reynolds 数相等 } (Re_g = x_c u_c \rho_{g0}/\mu_g \text{ 或 } Re_l = x_c u_c \rho_l/\mu_l) \quad (2)$$

$$\text{Euler 数相等 } (E = RT_c/u_c^2) \quad (3)$$

$$\text{Weber 数相等 } (W = x_c u_c^2 \rho_l/\sigma) \quad (4)$$

$$\text{密度比相等 } (\rho_g/\rho_l) \quad (5)$$

$$\text{粘性系数比相等 } (\mu_g/\mu_l) \quad (6)$$

$$\text{干度相等 } (\lambda) \quad (7)$$

条件(2)、(5)、(6)是相关的,可去掉(2)中气相 Reynolds 数相等的条件。

这样得到两相流压降系数:

$$\mathcal{P}_P = D_{TP}/D_{SP1} = \mathcal{P}_P(R_{cl}, F, W, E, \rho_g/\rho_l, \mu_g/\mu_l, \lambda) \quad (8)$$

是七个无量纲参数的函数。式中  $D_{TP}$  为两相流压降,  $D_{SP1}$  为单相液体流动的压降。同时, 阻力系数, 空隙率等流场参数也是七个无量纲参数的函数。

Lockhart-Martinelli(1949)曾引入著名的两相流相似因子:

$$X = \left[ \frac{D_{FFL}}{D_{PFG}} \right]^2 = \left[ \frac{1-X}{X} \right]^{2-n} \left[ \frac{\rho_g}{\rho_l} \right]^2 \left[ \frac{\mu_g}{\mu_l} \right]^n$$

$n$  与壁面粗糙度有关。它包含上述七个无量纲参数中的三个。多年来, 很多研究工作者围绕这个相似因子作两相流流态、压降、阻力、空隙率的相关工作, 取得了很大成绩。但这些相关公式应用时存在精度低、使用范围窄等缺陷。

### 4 两相流实验模拟准则

从上面的分析看出, 通常情况下, 气液两相流的实验模拟除满足根据边界条件确定的几何

相似外, 还需满足七个相似条件。这比单相流动(液体满足 Reynolds 相等, 气体满足 Reynolds 数和 Mach 数相等)要复杂得多。

若实验模拟时其重力加速度与实际流动的重力加速度相等, 相似条件给出特征尺度和特征速度满足的模拟条件为:

$$\frac{(x_c)_1}{(x_c)_2} = \frac{(\sigma/\rho_l)_1^{1/2}}{(\sigma/\rho_l)_2^{1/2}}; \frac{(u_c)_1}{(u_c)_2} = \frac{(\sigma/\rho_l)_1^{1/4}}{(\sigma/\rho_l)_2^{1/4}} \quad (9)$$

液相物性参数满足的模拟条件为:  $(g\mu_l^4/\rho_l\sigma^3)_1 = (g\mu_l^4/\rho_l\sigma^3)_2 = G = \text{constant}$  (10)

$G$  称为 Galileo 数。Galileo 数相当的两种介质就可以相互模拟。两种介质确定后, 就可根据式(9)得到它们的特征尺度、速度以及温度的模拟比例关系。

下表给出一些常见液体物性参数组合的 Galileo 数的倒数数值:

表 1 常见液体的 Galileo 数

Tab 1 G values of common liquids

液体	$\rho_l(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\sigma(\text{kg} \cdot \text{s}^{-2})$	$\mu_l(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$G^{-1}$
三氯甲烷	$1.48 \times 10^3$	$29 \times 10^{-3}$	$0.569 \times 10^{-3}$	$3.51 \times 10^{10}$
水	$1.0 \times 10^3$	$73 \times 10^{-3}$	$1.02 \times 10^{-3}$	$3.66 \times 10^{10}$
四氯化碳	$1.59 \times 10^3$	$26 \times 10^{-3}$	$0.981 \times 10^{-3}$	$3.08 \times 10^9$
甲醇	$0.786 \times 10^3$	$22 \times 10^{-3}$	$0.584 \times 10^{-3}$	$7.33 \times 10^9$
酒精	$0.784 \times 10^3$	$22 \times 10^{-3}$	$1.25 \times 10^{-3}$	$3.49 \times 10^8$
甘油	$1.26 \times 10^3$	$61 \times 10^{-3}$	1.6	$4.45 \times 10^{-3}$
润滑油	$0.88 \times 10^3$	$30 \times 10^{-3}$	0.36	$1.44 \times 10^{-1}$
原油	$(0.8 \sim 1.0) \times 10^3$	$30 \times 10^{-3}$	0.1~1	$2.2 \times 10^{-3} \sim 2.2 \times 10$
硫酸	$1.84 \times 10^3$	$55 \times 10^{-3}$	0.275	5.46

从表中看出, 各种液体 Galileo 数相差是非常悬殊的, 因此, 两相流动的实验模拟面临两个非常苛刻的条件: 一是很难找到 Galileo 数相近而又容易实现实验模拟的两种流体, 如水和原油, 两者 Galileo 数相差高达  $10^{10}$  倍。二是即使 Galileo 数相近的两种流体, 也很难用小尺度的实验设备实现大尺度工业流动的模拟, 以 Galileo 数相近的水和三氯甲烷为例(即用水模拟三氯甲烷的两相流动), 在重力加速度相等的条件下, 实验与实际流动的特征尺度与特征速度满足的关系为:  $(x_c)_{tr}/(x_c)_w = 0.52$ ,  $(u_c)_{tr}/(u_c)_w = 0.72$ 。即模拟设备的特征尺度约为实际流动的两倍, 速度约为 1.5 倍, 这对实验模拟是极为不利的。

如果重力对两相流动的影响比较重要, 而液体的表面张力对两相流动的影响并不显著, 则可放松 Weber 数相等的限制, 这时, 重力加速度相等时特征长度、速度满足的模拟条件为:

$$\frac{(x_c)_1}{(x_c)_2} = \frac{(\mu_l^2/g\rho_l^2)_1^{1/3}}{(\mu_l^2/g\rho_l^2)_2^{1/3}}; \frac{(u_c)_1}{(u_c)_2} = \frac{(g\mu_l/\rho_l)_1^{1/3}}{(g\mu_l/\rho_l)_2^{1/3}} \quad (11)$$

这时无量纲参数组成的模拟条件为:  $Re^2 E^3 F^2 = R^3 T_c^3 \rho_l^2 / g^2 \mu_l^2 = Q_1 = \text{constant}$ , 即

$$(R^3 T_c^3 \rho_l^2 / g^2 \mu_l^2)_1 = (R^3 T_c^3 \rho_l^2 / g^2 \mu_l^2)_2 \quad (12)$$

这时  $Q_1$  值不仅与液体的密度和粘性系数有关, 还与气体的气体常数有关。通过两种介质

的物性参数共同组合  $Q_1$  值就容易得多。

反过来, 如果重力对两相流动的影响不太重要, 而液体的表面张力对两相流动的影响较为显著, 则可放松 Froude 数相等的要求, 这时, 特征长度、特征速度满足的条件为:

$$x_c = R e_i^2 \mu_i^2 / W \sigma \rho_i \quad u_c = W \sigma / R e_i \mu_i \quad (13)$$

$$\text{模拟条件为: } \frac{(x_c)_1}{(x_c)_2} = \frac{(\mu_i^2 / \sigma \rho_i)_1}{(\mu_i^2 / \sigma \rho_i)_2} \quad \frac{(u_c)_1}{(u_c)_2} = \frac{(\sigma / \mu_i)_1}{(\sigma / \mu_i)_2} \quad (14)$$

这时无量纲参数组成的模拟条件为:  $\mu_i^2 R T / \sigma^2 = Q_2 = \text{constant}$ , 即:

$$(\mu_i^2 R T / \sigma^2)_1 = (\mu_i^2 R T / \sigma^2)_2 = Q_2 \quad (15)$$

## 5 石油与天然气两相流动的实验模拟

将上述结果用于以水和空气为介质的石油与天然气的两相流动模拟。

空气的密度为  $1.293 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 粘性系数为  $16.7 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 天然气(主要是甲烷气体)的密度为  $0.72 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 粘性系数为  $10.0 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从表 1 中可以看出, 石油与水的  $G$  值相差很大 ( $10^{10} \sim 10^{13}$  倍), 若同时考虑液体重力和表面张力的影响, 这种模拟是不可靠的。

由式 (9), 实验模拟的特征尺度和速度需满足:  $(x_c)_{\sigma-g} / (x_c)_{\omega-\alpha} = 0.6$ ,  $(u_c)_{\sigma-g} / (u_c)_{\omega-\alpha} = 0.8$ , 即模拟实验设备的尺寸应是实际流动装置尺寸的 1.5 倍, 速度是 1.2 倍。

两种模拟的密度比为:  $(\rho_g / \rho_l)_{\sigma-g} = 0.8 \times 10^{-3}$ ,  $(\rho_g / \rho_l)_{\omega-\alpha} = 1.29 \times 10^{-3}$

粘性系数比为:  $(\mu_g / \mu_l)_{\sigma-g} = 10^{-4} \sim 10^{-5}$ ,  $(\mu_g / \mu_l)_{\omega-\alpha} = 1.64 \times 10^{-2}$

即密度比相差约 1.6 倍, 粘性系数比相差范围却超过 160 倍。可见粘性系数比差别太大是造成流动不相似的主要根源。根据上节分析结果, 若需同时考虑液体重力和表面张力的影响, 必须采用改变温度或重力加速度的办法才能用水与空气的两相流动来模拟石油与天然气的两相流动。

在忽略液相张力的假设下, 同时不考虑气相粘性的影响, 由式 (11), 实验模拟的特征尺度与特征速度满足的关系为:  $(x_c)_{\sigma-g} / (x_c)_{\omega-\alpha} = 25$ ,  $(u_c)_{\sigma-g} / (u_c)_{\omega-\alpha} = 5$ , 即特征尺度可缩减 25 倍, 特征速度可缩减 5 倍。

由式 (14), 取特征温度为 300K, 模拟参数:  $(Q_1)_{\sigma-g} = 3.01 \times 10^{20}$ ,  $(Q_1)_{\omega-\alpha} = 6.13 \times 10^{23}$ , 两者相差很小。密度比差仍为 1.6 倍。

可见, 在忽略液相张力, 不考虑气相粘性影响的简化条件下, 可在与石油、天然气等温、等重力加速度环境用水和空气实现缩尺模拟, 且模拟参数的误差不是很大。

在忽略重力的假设下(同样不考虑气相粘性的影响), 由式 (14), 实验模拟的特征尺度与特征速度满足的关系为:  $(x_c)_{\sigma-g} / (x_c)_{\omega-\alpha} = 29 \sim 235$ ,  $(u_c)_{\sigma-g} / (u_c)_{\omega-\alpha} = 0.04$ 。由式 (15),  $(Q_2)_{\sigma-g} = 1.7 \times 10^6$ ,  $(Q_2)_{\omega-\alpha} = 1.7 \times 10^1$ , 可见这时的模拟也是难以实现的。

根据 Quandt (1965) 的研究结果, 重力影响为主的气液两相流动主要出现分层流、段塞流和波动流等流态, 这是石油天然气输送中常见的流态, 所以在忽略液相表面张力和气相粘性的条件下用空气与水的两相流动来模拟石油与天然气的两相流动是可行的。当然, 这种分析是对粘性系数较低 ( $\mu = 0.1$ ) 的油进行的, 若对粘性系数较高 ( $\mu > 0.5$ ) 的稠油, 用空气与水的模拟结果就不太可靠了。自然, 这时 Newton 流体的假设已不再成立。



## 6 结论和讨论

- (1) 本文介绍的多相管流模拟试验装置, 已成为研究管流流态的仿真规律和压降规律, 以及海底管线长距离混输系统中的多相增压泵、混相流量计和油气分离器等关键设施及其性能的重要实验设备。
- (2) 通过对气液两相流动运动方程和边界条件的相似性分析得出, 气液两相管流需要 7 个无量纲参数控制: 即气液粘性比、密度比、干度(流量比)、Euler 数、Froude 数、Weber 数和液相 Reynolds 数。
- (3) 在通常情况下, 两相流动的实验模拟将面临很难找到 Galileo 数相近的两种流体和实现所需要的缩尺比例两大难题。
- (4) 若忽略液相张力和气相粘性影响, 可在与石油和天然气等温、等重力加速度环境下用水和空气实现缩尺模拟, 且模拟参数的误差不是很大。
- (5) 对粘性系数较高( $\mu > 0.5$ ) 的稠油, 很难用空气与水来模拟石油与天然气的两相流动。需直接用轻质油和空气或轻质油、空气、水来模拟石油、天然气或石油、天然气、水的两相或三相流动。下一步, 我们将在实验室实现油气或油气水的直接模拟。

致谢: 本文设备建造得到郑哲敏院士的关心和支持, 本文研究思路和理论推导得到郑哲敏院士的直接指导, 作者在此表示衷心感谢。

## 参考文献

- 1 Kasturi G, Stepanek J B. Two-phase flow - I: Pressure drop and void fraction measurement in concurrent gas liquid flow in a coil; - II: Parameters for void fraction and pressure correlation. Chem. Engng Sci 1972, 27, 1871~ 1891
- 2 Lockhart R W, Martinelli R C. Proposed correlation of data for isothermal two phase, two-component flow in pipes Chem. Engng Prog 1949, 45, 39~ 48
- 3 Quandt E R. Analysis of gas-liquid flow patterns Chem. Eng Prog, Ser, 1965, 57, 61, 128~ 135