

乳化剂对气液垂直管流中压降影响的研究

高梦忱, 许晶禹*, 吴应湘

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

通讯作者 E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

摘要: 在石油行业真实管路流动中, 几乎都伴有乳化剂的添加。然而由于气液两相流动的复杂特性, 考虑乳化剂对气液两相垂直管流压降影响规律的研究工作, 仍十分有限。本研究通过理论分析与实验研究相结合的手段, 对伴有乳化剂添加的气液垂直管流流动特性和压降特征进行探讨。研究发现, 乳化剂的添加可以促进流动更加趋于稳定。其结果有助于为今后研究工作提供参考。

关键词: 乳化剂; 气液两相流; 垂直管路; 流动特征; 压降

1 引言

气液两相流动是一种十分复杂的流动现象, 其表现之一就是气液两相在各种流量组合下表现出不同的流动形态, 每一种流型具有其特定的相分布特质以及气液界面形状。当一种流型向另一种流型转化时, 气液界面也会随之发生巨大改变, 这对于两相流动机理的认识造成了巨大的挑战。尤其是针对目前石油工业领域广泛应用的油气混输系统中的两相流动, 人们至今仍没有完全认知。针对两相流系统而言, 其最重要的特征之一就是两相流动压降特性。因为它不仅表征着能量损耗情况, 并且可对流动过程进行如实反映^[1]。在诸多影响因素中, 压降特性与初始状态下的各相物理力学参数、及流动过程中的控制参量、甚至是与输送管道的几何形状、加工尺寸、安装位置等诸多因素密切相关。本研究工作仅限于立管系统垂直管路中的气液两相压降特性, 并考虑现场实际情况, 在气液两相流动过程中添加乳化剂。采用理论分析与实验研究相结合的手段, 针对乳化剂对垂直管路气液两相流动过程及压降特性的影响, 进行探讨。

2 理论分析

首先, 对于在液体中的气体运动速度, 可由漂移流模型给出:

$$V_g = C_0 V_m + V_{B\infty} \cdot f(\alpha) \quad (1)$$

其中, C_0 为与流型相关的分散系数, $V_{B\infty}$ 为气泡在有界区域内的上升速度, $f(\alpha)$ 表征相邻气泡在该气泡上升过程中的影响。

对于竖直上升管中的气液流动而言, 当流型为泡状流时 C_0 可取值 1.2^[2], 而对段塞流动而言取值 1.29^[3]。对于泡状流, 有学者建议采用下式来计算气泡上升速度^[4]:

$$V_{B\infty} = 1.53 \left[g(\rho_l - \rho_g) \sigma / \rho_l^2 \right]^{1/4} \quad (2)$$

类似地, 考虑在段塞流动中, 也将段塞单元中的气相近似为一个拉长的泰勒泡, 那么气泡的上升速度可以表示为:

$$V_{S\infty} = C_1 \sqrt{g(\rho_l - \rho_g) \sigma / \rho_l^2} \quad (3)$$

这里的系数 C_1 通常取值在 0.328 到 0.35 之间^[5]。

而在段塞流动实际过程中, 我们从实验的角度观察到确实存在气泡追赶聚并的现象。为了描述这一现象, 对以上公式进行改写, 得到:

$$V_{Tb} = (C_0 V_m + V_{S\infty}) \left(1 + B e^{-\beta(L_{b,t}/L_b)} \right) \quad (4)$$

其中, L_b 为稳定流动中最小段塞长度, $L_{b,t}$ 为气泡前的段塞长度。系数 B 和 β 可分别取值 5.5 和 0.6^[6]。

因此, 若我们将气液两相流动简化为一维模型并应用均相流假设, 通过结合速度关系, 可以得到气液两相流动中的摩擦压降表达式:

$$\Delta P_f = 2f \rho_m V^2 / D \quad (5)$$

其中, f 为两相摩擦因子, 可以通过经验公式选取。 D 为管路直径, ρ_m 为气液两相混合密度。此外, 重力压降可表示为:

$$\Delta P_g = \rho_m g L \quad (6)$$

其中 g 为当地重力加速, L 为测试段竖直管路长度。若在充分发展段塞流动中, 忽略加速压降效应, 可以得到总压降关系式为:

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_g \quad (7)$$

3 实验研究

为了考察乳化剂对流体介质的影响,静态实验部分针对乳化剂溶液与固体壁面接触角进行研究。实验过程采用德国 Dataphysics 表面张力仪进行,乳化剂选用十二烷基苯磺酸钠,并完成了不同溶液浓度样本的比较分析。其结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,添加乳化剂对于气液两相的影响,主要体现在有效降低气液两相间的界面张力上,其外在表现为液相与管路壁面的接触角不断减小。并且当添加很少量的乳化剂时,即浓度仅为 200mg/L 时,即可达到接触角度减小约 75%,而继续添加乳化剂,仅会主要表现在动态接触角的减小上。

表 1 乳化剂浓度对流体介质的影响

序号	浓度/(mg/L)	接触角/(°)		方差/(°)	
1	纯净水	91.67	91.60	3.29	2.35
2	自来水	89.17	88.70	1.92	1.40
3	200	60.68	59.67	3.40	4.31
4	400	60.37	60.08	5.44	4.98
5	600	52.68	51.28	4.10	4.06
6	800	57.03	56.95	5.73	6.94
7	1000	48.72	48.63	6.53	6.21
8	5000	27.27	26.48	10.81	7.31

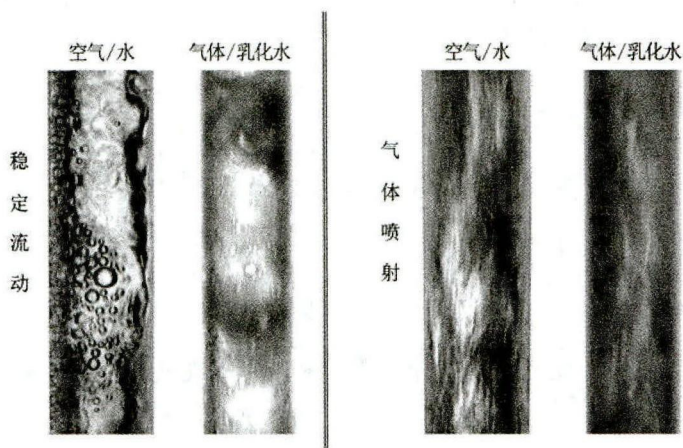


图 1 气液两相管路流动

从图 1 中可以看出,在相同工况条件及操作环境下,乳化剂的添加对于气液流动结构具有显著影响。同一气相表观流速下,液相表观流速越大,流动越趋于稳定。而在同一液相流速下,由于气相流速的不断增大,使得在管路中心处形成的气柱越来越趋于稳定,并使气液界面更加清晰。在气相流速较低的工况下,由于很难维持长时间的均匀气体喷射,因此使得气液混合物在立管中产生上下震荡。而随着气相速度的增大,气液界面由波状向清晰稳定的平滑状过渡。然而,乳化剂对流型转化的影响并不明显。

从图 2 中可以看出,段塞流动的压降曲线呈现出明显的波峰波谷交替出现的规律,并可据此对段塞流动解阶段进行划分。当添加乳化剂后,这种特征仍未消失:证明乳化剂很难从本质上引起流型转换。而对于添加乳化剂后的气液流动,其流动阶段发生明显改变,如液体回流时间明显缩短。造成这一现象的主要原因也与气液界面的表面张力有关。

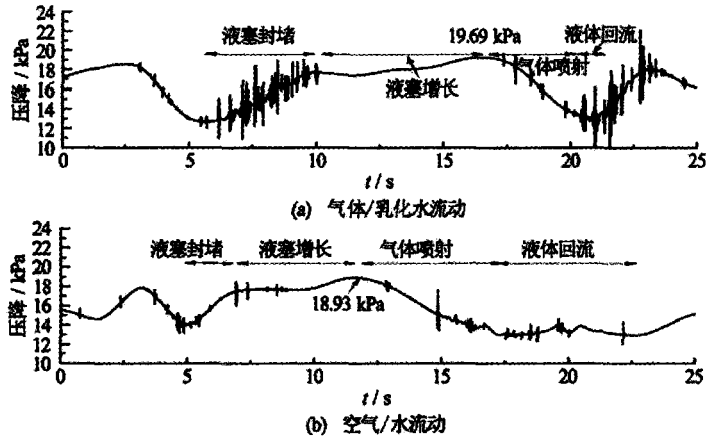


图 2 压降特性曲线

对于压降而言,仅通过理论推导很难得到其精确解。我们在这里通过实验研究,结合量纲分析,以求对压降特性有一半定量化了解。影响压降特性的因素,按照来源可主要分为操作参数、结构参数、以及物性参数等:

$$\Delta P = f(V_{sl}, V_{sg}, p_{in}, p_{out}, g, \rho_l, \rho_g, \mu_l, \mu_g, \sigma, d, L_{in}, L_{out}, \theta) \quad (8)$$

在相同工况条件下,混合流速为液相表观流速与气相表观流速之和:

$$V_m = V_{sl} + V_{sg} \quad (9)$$

因此对上述关系式进行无量纲化,可以得到:

$$Eu = f(Re_m) \quad (10)$$

其中: $Eu = \Delta P / \rho_m V^2$, $Re_m = \rho_m V^2 D / \mu$ 。因此,在保证其他参数为常数的条件下,在

对数坐标系下做出无量纲参数间的变化关系, 如图 3 所示。对于其表现出的极强的线性关系, 因此 Eu 与 Re_m 之间存在如下指数表达式:

$$Eu = cRe_m^b \quad (11)$$

当添加乳化剂后, 对于欧拉数的变化趋势并未产生明显影响, 然而使其拟合系数更加趋于 1, 这说明真实流动更加趋于稳定, 且更符合理论模型所做出的预测。究其原因, 我们分析可能与乳化剂形成泡沫基层有关^[9]。这一流动结构的形成可能造成在不同气液比条件下摩擦压降的变化, 并且使压降的拟合规律表现出更强的线性相关性。

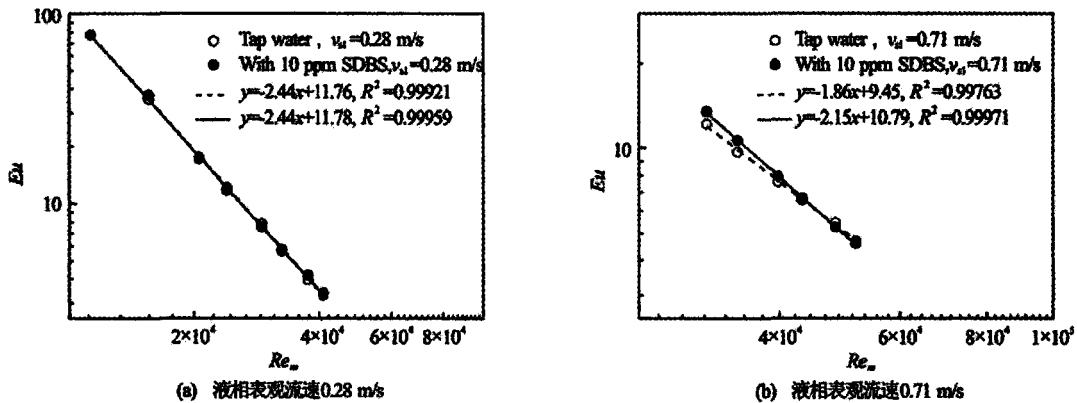


图 3 欧拉数随雷诺数变化规律

参 考 文 献

- Xu J Y, Gao M C, Zhang J. Pressure drop models for gas/non-Newtonian power-law fluids flow in horizontal pipes. Chem. Eng. Tec, 2014, 37: 717-722.
- Wallis G B. One dimensional two-phase flow. J. McGraw, New York, 1969.
- Fernandes S R., Dukler A E. Hydrodynamic model for gas-liquid slug flow in vertical tubes. AIChE J., 1983, 29: 981-989.
- Harmathy T. Velocity of large drops and bubbles in media of infinite and of restricted extent. AIChE J., 1960, 6(2): 281-288.
- Nicklin D J, Wilkes J O. Two-phase flow in vertical tubes. Trans. Inst. Chem. Engrs., 1962, 40: 61-68.
- Moissis R, Griffith P. Entrance effects in a two-phase slug flow. J. Heat Transfer, 1962, 84: 29-39.
- Xia G D, Chai L. Influence of surfactant on two-phase flow regime and pressure drop in upward inclined pipes. J. Hydrodyn. 2012, 24: 39-49.
- Rozenblit R, Gurevich M, Lengel Y, et al. Flow patterns and heat transfer in vertical upward air-water flow

with surfactant. *Int. J. Multiphase Flow*, 2006, 36: 889-901.

- 9 van Nimwegen A T, Portela L M, Henkes R A W M. The effect of surfactants on air-water annular and churn flow in vertical pipes. Part 1: Morphology of the air-water interface. *Int. J. Multiphase Flow*, 2015, 71: 133-145.

Influences of emulsifier additive on pressure drops of gas-liquid flows in the vertical pipe

GAO Meng-chen, XU Jing-yu, WU Ying-xiang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190. Email:xujingyu@imech.ac.cn)

Abstract: Almost every real flow case in the oil industry is with the addition of emulsifier. However, the research on the influence of emulsifier on pressure drops of vertical flow is limited, since the gas-liquid flow processing is very complex. In this paper, flow characteristics and pressure drops of gas-liquid vertical flows with emulsifier additive have all been discussed in the view of theoretical analysis and experimental measurement. It can be seen from the result, the flow tends to be more uniform with emulsifier additive, which must be as a reference for the future work.

Key words: Emulsifier; Gas-liquid flows; Vertical pipe; Flow characteristics; Pressure drops