

垂直管中气液两相混输压降的实验研究

刘琪, 李军亮, 涂亚明

(长江大学石油工程学院, 武汉 430100)

摘要: 本论文研究了气液两相混输流动参数变化对垂直管中气液两相混输压降的影响及压降的计算方法, 实验工况为: 压力范围为 0~3.5MPa, 液体表观流速为 0.06~0.23m/s, 管径为 60mm, 实验压降测量长度为 8.0m。实验表明, 液体流量和气液比都会影响垂直管气液两相流压降的大小。选择经典的 Beggs-Brill 模型进行出口压力预测, 预测结果的平均误差为 26.20%, 不确定度为 14.49%。进一步分析对压降计算敏感性最大的因素沿程阻力系数, 采用数据拟合法对沿程阻力系数进行修正, 进而对 Beggs-Brill 模型进行修正, 修正后的 Beggs-Brill 模型计算出口压力的平均误差为 12.92%, 不确定度为 8.86%。在实际生产中, 可以使用修正后的 Beggs-Brill 模型以更精确地计算气液两相混输垂直管的压降。

关键词: 气液两相流; 垂直管; 压降模型; Beggs-Brill; 误差; 不确定度

中图分类号: O359

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2017)04-0372-05

1 两相流压降计算研究现状

近年来, 随着全世界范围内陆上油气资源的减少, 油气开采已向近海或深海区域发展。伴随着海上凝析油气田的开发, 单管的气液混输工艺技术得到越来越广泛的应用。在海上油气开采中, 由于海底地形地貌的多样性, 使得管路布置多种多样, 既有水平管, 也有垂直管。考虑输送经济性, 必须进行优化设计, 因而研究各种管路下的流动特性计算, 在油气混输中也具有重要的意义^[1]。对于水平管气液两相混输的研究较多较广, 而在垂直气液两相混输中, 人们针对压降问题也提出了许多模型, 但目前为止还没有统一的公认的精确计算公式。

垂直管中气液两相流压降模型的发展经历了三个阶段: 经验关系式, 这是一种比较简单和常用的方法, 主要的代表有 Lockhart-Martinelli^[2]、Peotmann-Carpenter^[3]、Baxendell-Thomas^[4]、Tek^[5]

和 Fancher^[6]等提出的多种计算模型。这种方法中气液两相流很多参数都是根据经验公式计算出来的, 优点是易于计算, 缺点是受实验数据范围限制, 且没能全面地考虑影响管流压降的其他因素。

半经验关系式, 该方法分析了气液两相界面的机构, 考虑不同流型对压降的影响, 其中一些参数仍使用经验值。其代表模型有 Duns-Ros^[7]、Hagedorn-Brown^[8]、Govier-Aziz^[9]和 Beggs-Brill^[10]等提出的模型。综合机理模型, 这是一种通过实验研究、建立自己的流型判断机理模型, 并针对每种流型建立各自的压降模型。该方法充分从机理上进行研究, 能够清楚地解释流型产生的原因, 还能预测流型的结构参数, 具有广阔的发展前景。主要代表模型有 Hassan-Kabir^[11]、Ansari^[12]、Chokshi^[13]、Gomez^[14]和 Hassan 等^[15]提出的压降模型。本文着重介绍常用的计算垂直管中气液两相流模型的 Beggs-Brill 方法, 该方法也是油田油

气集输设计技术手册中推荐的压降计算公式^[16]。

综上所述,在过去的研究中,不同学者提出了各种不同的压降模型,但是每种压降模型都有各自的适用性和限制性。本文通过实验研究,探索垂直管中气液两相流压降随着某一参数变化而变化的规律,用实验数据验证 Beggs-Brill 方法,并针对沿程阻力系数这一参数对 Beggs-Brill 方法进行修正。

2 压降预测模型

Beggs-Brill 方法适用于任何倾斜角度下的气液两相流的压降计算。Beggs-Brill 基于均相流能量守恒方程,不考虑气液混合物与外界的做功情况,根据大量实验得到的气液混合物压降公式为

$$\frac{dp}{dL} = \frac{[H_l \rho_l + (1-H_l) \rho_g] g \sin \theta + \lambda_m \frac{G_m v_m}{2DA}}{1 - \frac{[H_l \rho_l + (1-H_l) \rho_g] v_m v_{sg}}{p_o}} \quad (1)$$

式中, p 为混输管道平均压力(绝对), Pa; L 为管线长度, m; θ 为管线倾角, 度或弧度(垂直管 $\theta=90^\circ$); v_m 为气液混合物速度, m/s; v_{sg} 为气相折算速度, m/s; ρ_l 、 ρ_g 分别为液相、气相的密度, kg/m³; G_m 为气液混合物质量流量, kg/s; p_o 为管线内平均绝对压力, Pa; D 为管线直径, m; g 为重力加速度, m/s²; H_l 为截面含液率, 即持液

率; λ_m 为混合物的水力摩阻系数。

对于垂直管道, 则压降公式可以简化为

$$\frac{dp}{dL} = \frac{[H_l \rho_l + (1-H_l) \rho_g] g + \lambda_m \frac{G_m v_m}{2DA}}{1 - \frac{[H_l \rho_l + (1-H_l) \rho_g] v_m v_{sg}}{p_o}} \quad (2)$$

式中各参数的理论计算和选取可参考文献[10]。

3 实验装置和实验方法

3.1 实验装置

本文气液两相流压降测量的实验是在中石油采油采气重点实验室长江大学研究室进行(图1)。该装置由油水混合罐、液泵、稳压器、压力计、流量计、气液混合测试管段、气液分离器和配套管汇组成, 其主要系统为动力系统、计量系统、气液分离系统等。液泵有 1.5KW、5.5KW 和 37KW 三种不同功率的柱塞泵, 可以提供的液相范围是 0~20m³/h。空气压缩机分中压和常压两种, 可以提供的气相范围是 0~2328m³/h。液体流量计、气体流量计和差压传感器精度等级分别是 1.0 级、0.30 级和 0.25 级, 可以保障实验的准确性。流型的识别采用曝光时间为 1 μ s、500 帧/秒的高速摄像机。本次的实验介质为白油和自来水, 压力调节范围为 0~3.5MPa。

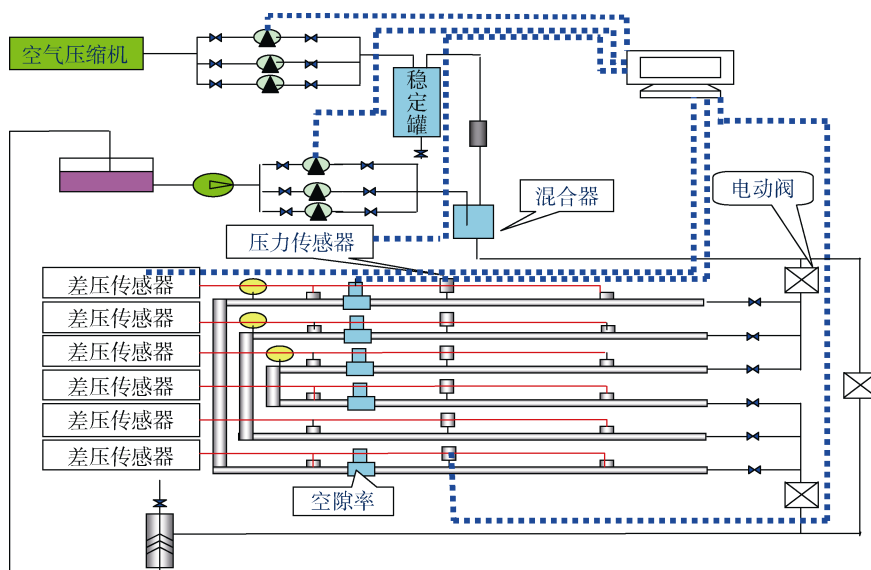


图1 气液两相流实验设备流程图

具体实验操作为：1) 将实验台架上升至 90° 并固定。待抽油泵通电后，一端放入储油罐内，另一端放入白油桶内，使得白油顺利进入到实验的油水混合罐内。根据实验内容，选择 60mm 的有机玻璃管路，基于不同的气量要求选择合适的空气压缩机和气量阀门管路，针对不同的液量要求选择合适的液体管路；2) 通过仪表台处的电脑打开液体阀门，调节柱塞泵的频率使得液体流量满足实验内容，待液相稳定后打开气体阀门，使得白油和空气进入到实验管段内混合流动。待气液混合后，电脑台内记录的液相和气相流量会有所变化，此时要通过调节气相和液相阀门的开度，使得两相的流量都在实验设计参数左右。待管内各参数处于稳定后，观察实验管段内流型并拍照存入电脑，通过电脑记录并储存各实验数据；3) 在电脑上对液相和气相流量进行误差计算，若误差在 5% 以内则认为实验数据满足要求。如果误差不能满足要求则需要再次调节液相和气相阀门，使得满足实验设计内容要求；4) 当定液量、不同气液比的实验全部完成后，根据液体流量适当更换柱塞泵，进行其他液量下不同气液比的流动实验。

3.2 实验方法

实验对液相流量和气液比两个参数采用控制变量的方法进行组合。首先固定一个液量值，在此液量下调节 9 个不同气液比，总计有 90 个工况点。图 2 是本次实验的工况点在 Beggs-Brill 流型图^[10]中的范围。

4 实验结果与讨论

4.1 实验结果

图 3 是在同一液量下、压降和气液比的关系，图 4 是在同一气液比下、压降和液量的关系。由图 3 可知，同一液量条件下，随着气液比增加，压降先下降后上升。从图 4 中可以得出，同一气液比条件下，随着液量增加，压降呈现先下降后上升的趋势。这是因为在小液量下，实验管段底

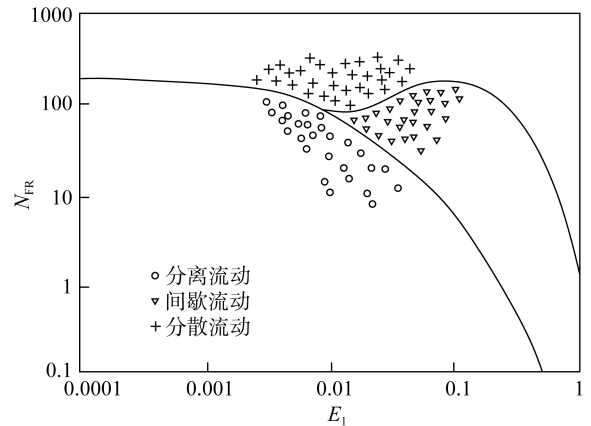


图 2 实验点在 Beggs-Brill 流型图中的范围图

部位形成液膜，从而气液混合物和管壁的摩擦减小，因而摩擦压降减小，所以压降随着气液比的增加而减小。但随着气量的增大，管道内流体开始过渡到环状流，在管壁形成连续的液膜，液膜与管壁之间的摩擦系数较大，因而摩擦压降较大，压降也随之逐渐增大。当液量较大时，管壁一直有液膜形成，因此压降不会出现先减小的趋势。

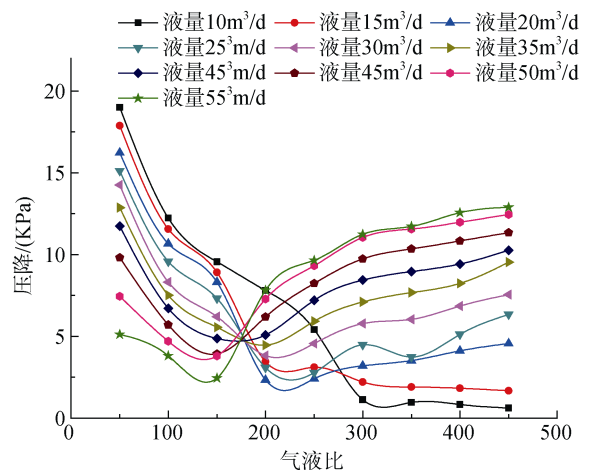


图 3 同一液量下压降和气液比的关系

4.2 模型预测结果与分析

4.2.1 Beggs-Brill 预测结果

图 5 是采用 Beggs-Brill 模型计算出口压力与实际出口压力的比较图，平均相对误差是 26.20%，不确定度为 14.49%，无法满足工程实际需求，因此需要对 Beggs-Brill 模型进行修正。

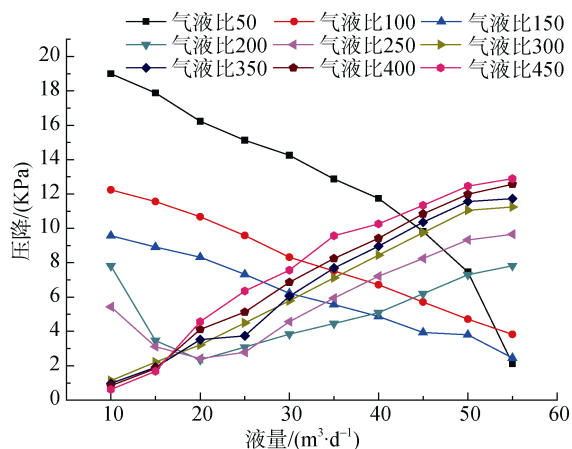


图4 同一气液比下流量和气液比的关系

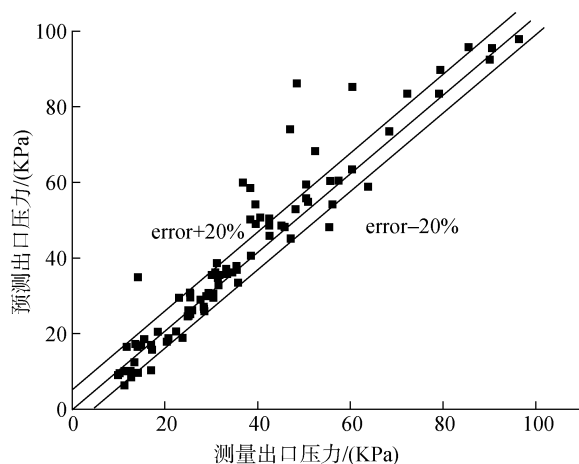


图5 Beggs-Brill 模型预测出口压力值与实验值的比较

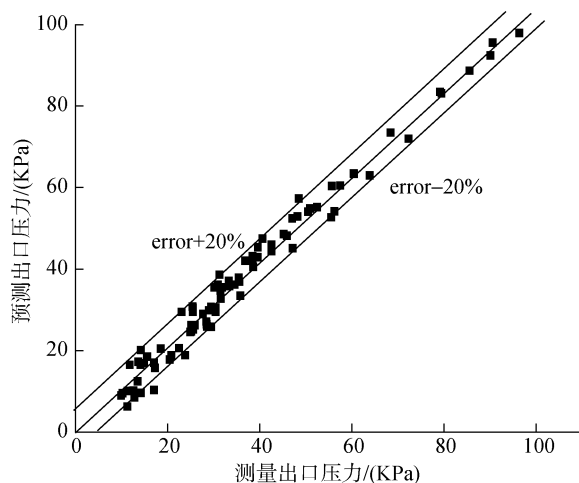


图6 修正的 Beggs-Brill 模型预测出口压力值与实验值的比较

4.2.2 压降模型的修正

由 Beggs-Brill 模型计算式可以看出, 影响管道压降计算精度的主要因素包括: 管道直径 D 、

管道长度 L 、混合物质量流量 G_m 、混合物流速 v_m 、持液率 H_f 、沿程阻力系数 λ_m , 其中 λ_m 对管道压降精度影响最明显。因此, 对 Beggs-Brill 压降模型的修正主要是对沿程阻力系数 λ_m 进行修正。

实验中发现, 通过实验数据计算的实际沿程阻力系数 $\lambda_{m\text{实际}}$ 和气液混输管道理论沿程阻力系数 $\lambda_{m\text{理论}}$ 成线性关系, 因此定义 $\lambda_{m\text{实际}} = A\lambda_{m\text{理论}} + B\lambda_{m\text{实际}}$, 修正 Beggs-Brill 模型的关键是确定 A 、 B 的值。

利用实验数据, 采用最小二乘法, 基于 spass 软件拟合出 A 为 0.8405, B 为 7×10^{-6} 。Beggs-Brill 模型修正后出口压力预测值和测量值比较结果如图 6 所示, 平均相对误差为 12.92%, 不确定度为 8.86%。

4.2.3 两种压降模型预测结果的比较

表 1 为 Beggs-Brill 模型和修正的 Beggs-Brill 模型进行的比较。从表 1 中可以看出, Beggs-Brill 模型修正后平均误差和不确定明显降低, 适用性较好, 可用于进行工程中的垂直管气液两相流压降的计算。

表1 预测模型偏差比较表

预测模型	平均误差, %	不确定度, %
Beggs-Brill	26.20	14.49
修正的 Beggs-Brill	12.92	8.86

5 结论

(1) 实验研究了液体流量和气液比对垂直管道气液两相混输压降的影响。当其他参数不变时, 压降随着气液比、液量的增加, 大致趋势都是先下降后上升。因此, 在实际生产中气液两相混输时, 可以大致预测压降值, 并选择最优的输送条件。

(2) 采用 Beggs-Brill 模型进行垂直管气液混输压降计算时, 平均相对误差是 26.20%, 不确定度为 14.49%, 因其误差较大不符合工程需求。

(3) 根据沿程阻力系数对 Beggs-Brill 模型进行修正, 修正之后, 平均误差由 26.20% 降低到 12.92%, 不确定度也降低为 8.86%。因此, 在气液两相混输垂直管路中计算时, 选择 Beggs-Brill

模型进行计算时, 需要修正后再使用, 才能精确地反映混输管路的压降值。

参考文献

- [1] 林宗虎, 郭烈锦, 陈听宽, 等. 能源动力中多相流热物理基础理论与技术研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 760-800.
- [2] Lockhart, R. W., Martinelli, R. C. Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase Two-Component Flow in Pipes[J]. Chemical Engineering Progress, 1949, 45(1): 39-48.
- [3] Poettmann, F.H., Carpenter, P.G. The Multiphase Flow of Gas, Oil and Water Through Vertical Flow Strings with Application to Design of Gas-Lift Installations[J]. Drilling and Production Practice, API, 1952, 14: 257-317.
- [4] Baxendell, P.B., Thomas, R. The Calculation of Pressure Gradients In High-Rate Flowing Well[J]. Journal of Petroleum Technology, 1961, 13(10): 1023-1028.
- [5] Tek, M.R. Multiphase Flow of Water, Oil and Nature Gas Through Vertical Flow String[J]. Journal of Petroleum Technology, 1961, 13(10): 1029-1036.
- [6] Fancher, G.H. Prediction of Pressure Gradients for Multiphase Flow in Tubing[J]. SPE Journal, 1963, 3(1): 59-69.
- [7] AR Hagedorn, KE Brown. The Effect of Liquid Viscosity in Two-Phase Vertical Flow[J]. Journal of Petroleum Technology, 1964, 16(2): 203-210.
- [8] Orkiszewski J. Predicting Two-phase Pressure Drops in Vertical Pipe[J]. JPT. 1967.
- [9] Aziz K., Govier G.W., Fogarasi M.. Pressure Drop in Wells Producing Oil and Gas[J]. Journal of Petroleum Technology, 1972: 38-47.
- [10] Beggs H.D., Brill J.P.. A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes[J]. Journal of Petroleum Technology, 1973, 25(5): 607-617.
- [11] Hassan, A.R., Kabir, C.S. A Study of Multiphase Flow Behavior in Vertical Wells[J]. SPE Production Engineering, 1988, 3(2): 263-272.
- [12] Ansari, A.M., Sylvester, N.D., Sarica, C., et al. A Comprehensive Mechanistic Model for Upward Two-Phase Flow in Wellbores [J]. SPE Production & Facilities, 1994, 9(2): 143-151.
- [13] Chokshi, R.N., Schmidt, Z., Doty, D.R. Experimental Study and the Development of a Mechanistic Model for Two-Phase Flow Through Vertical Tubing[C]. SPE Western Regional Meeting, Anchorage, Alaska, May, 1996: 22-24.
- [14] Gomez, L.E., Shoham, O., Schmidt, Z., et al. Unified Mechanistic Model for Steady-State Two-Phase Flow: Horizontal to Vertical Upward Flow[J]. SPE Journal, 2000, 5(3): 339-350.
- [15] Hassan, A.R., Kabir, C.S., Sayarpour, M. Simplified Two-Phase Flow Modeling in Wellbores[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 72(1): 42-49.
- [16] 油田油气集输设计技术手册编写组. 油田油气集输设计技术手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 722-731.

Experimental Study on Pressure Drop of the Gas-Liquid Two-phase Flow in Vertical Pipes

Liu Qi, Li Junliang, Tu Yaming

(School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: In order to study how the pressure drop of gas-liquid flow in vertical pipes varies with flow parameters as well as its calculation method, we conducted experiments in key laboratory of oil and gas exploitation in the Yangtze university. The experimental conditions were as follows: the working pressure from 0 to 3.5 MPa, the superficial liquid velocity from 0.06 to 0.23 m/s, the pipe diameter of DN60, and the pressure drop measuring distance of 8.0m. Experimental results show that liquid velocity and gas liquid ratio affect the value of pressure drop. The classical Beggs-Brill correlation was chosen to predict the value of exit pressure with an average error of 26.20% and an uncertainty of 14.49%. With the further research on the Beggs-Brill correlation, it's found that the coefficient of drag coefficient of the path is the major factor which influences pressure drop. Finally, the Beggs-Brill correlation is modified by using the method of numerical fitting in the coefficient of drag coefficient of the path, and an average error and uncertainty of the modified Beggs-Brill correlation to predict the value of exit pressure are 12.92% and 8.86% respectively, so we can use the modified Beggs-Brill correlation to calculate the pressure drop of gas-liquid flow in vertical pipes more accurately.

Keywords: gas-liquid two-phase flow; vertical pipes; pressure drop model; Beggs-Brill; error; uncertainty