

文章编号:1673-5005(2009)04-0107-05

水平管油-气-水三相流压力梯度变化特性

张足斌¹, 王海琴¹, 林学增²

(1. 中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266555; 2. 胜利油田 桩西采油厂设备科, 山东 东营 257237)

摘要:在内径 50 mm、长 40 m 的不锈钢水平环道内,利用压力传感器对油-气-水三相管流压力波动特性进行试验研究,从流型的观点分析三相管流平均压力梯度随液相中入口体积含水率、气相折算速度以及液相折算速度的变化规律。结果表明:油-气-水三相管流条件下的转相对应的人口体积含水率为 40%,低于油水两相管流转相对应的人口体积含水率(60%),油-气-水三相流动转相的发生与折算液速、折算气速和液相含水率均有关,Lockhart & Martinelli 两相模型可以用来预测 AN || O/W 流型的油-气-水三相流动压力梯度。

关键词:油-气-水三相流; 压力梯度; 转相; 水平圆管; 试验研究

中图分类号:TE 312 **文献标识码:**A

Variation characteristics of pressure gradient for oil-gas-water three-phase flow in horizontal pipeline

ZHANG Zu-bin¹, WANG Hai-qin¹, LIN Xue-zeng²

(1. College of Transport & Storage and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;

2. Equipment Section of Zhuangxi Oil Production Plant, Shengli Oilfield, Dongying 257237, China)

Abstract: Fluctuation characteristics of pressure gradient for gas-oil-water three-phase flow were experimentally investigated by use of pressure sensors in the horizontal stainless steel pipe with the inner diameter of 50 mm and the length of 40 m. From the view of flow regime, the influences of input water cut in liquid, gas superficial velocity and liquid superficial velocity on pressure gradient were analyzed. The results show that input water cut of phase inversion in three-phase flow was about 40%, which was lower than that in oil-water two-phase flow (about 60%). For gas-oil-water three-phase flow, water cut for point of phase inversion was related to gas superficial velocity, liquid superficial velocity and input water cut in liquid. Lockhart & Martinelli two-phase model could predict oil-gas-water three-phase pressure gradient of AN || O/W flow regime.

Key words: oil-gas-water three-phase flow; pressure gradient; phase inversion; horizontal circular pipes; experimental study

油-气-水三相流动是普遍存在的,最为常见的就是天然气-原油-水的混合物在管道中的混合流动,即油-气-水混合输送。油-气-水三相流动压力梯度的变化会影响油田的生产。由于对气-液界面和油-水界面以及两者之间耦合实质的预测具有不确定性,因此有关油-气-水三相流动压力梯度的研究成果非常有限^[1-2]。Hewitt^[3]进行了水平管的油-气-水三相流试验,并采用分相流模型对三相分层流的压力梯度进行了数值计算,结果与实测值之间虽然比较吻合,但是模型中没有考虑复杂相界面引起的摩擦阻力与流

型之间的关系。Odozi^[4]仅进行了油-气-水三相段塞流的试验,并采用 Beggs & Brill 气液两相压降计算关联式结合自己早先开发的非线性混合物黏度计算模型^[5]预测了压力梯度,其值与试验测得的压降峰值较为吻合。油水共流不仅影响管内三相流动型态,也影响压力梯度变化,因而油-气-水三相流动的压力梯度变化特性是气液流动和油水流动的综合反映。笔者以试验研究为依托,从三相流型的观点分析油-气-水管内共流时压力梯度的变化特性,为油-气-水三相流特性的深入研究提供一定的依据。

收稿日期:2008-12-16

基金项目:中国石油大学(华东)博士科研基金(Y081525)

作者简介:张足斌(1971-),男(汉族),江苏泰兴人,副教授,博士研究生,从事管道输送技术以及油罐及管道强度的教学与科研工作。

1 试验系统

图1为油-气-水三相流试验装置流程示意图。

从压缩机来的压缩空气经气体缓冲罐稳定和金属管浮子流量计计量后进入混合器;油罐中的油经齿轮油泵增压和椭圆齿轮流量计计量后进入混合器;水罐中的水经离心水泵增压和椭圆齿轮流量计计量后进入混合器;油、气、水三相在混合器中混合后进入试验段(图2),从试验段流出来的油-气-水三相混合物经旋风式分离器分离后,气体排入大气,油水两相进入重力沉降式分离器,经分离后,油相返回油罐,水相返回水罐。

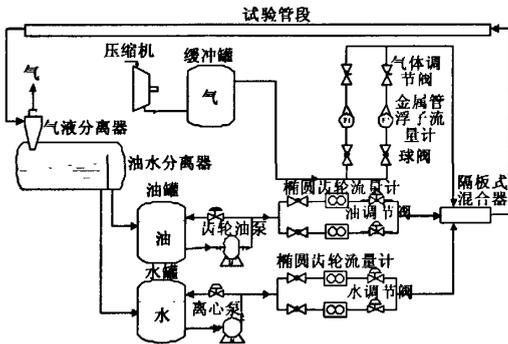


图1 油-气-水三相流试验环道

Fig.1 Oil-gas-water three-phase flow loop

试验管路为内径0.05 m、长40 m的不锈钢管,其中包括一段内径50 mm、长1 m的透明有机玻璃管,管路布置如图2所示。其中,P1~P6为Keller PA23 压阻式压力变送器,HL1和HL3为环型电导探针,HL2和HL4为线型双平行电导探针。

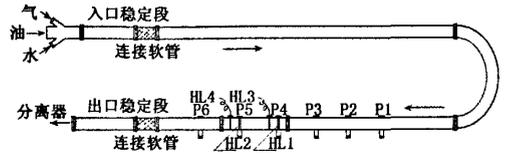


图2 试验管路布置

Fig.2 Test section arrangement

试验油、气、水三相分别为白油、空气和自来水。试验温度控制在20~25℃;油相的密度ρ_o为837.3~840.2 kg/m³,黏度μ_o为23.1~33.6 mPa·s;水相的密度ρ_w为998.2 kg/m³,黏度μ_w为1.005 mPa·s;油水的界面张力为41.3~41.5 mN/m。

试验参数:气相折算速度为0.142~25.5 m/s,油相折算速度为0.01415~1.415 m/s,水相折算速度为0.01415~1.415 m/s;油水体积比分别为9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5, 4:6, 3:7, 2:8, 1:9。

2 压力梯度特性的试验分析

影响油-气-水三相流动压力梯度的因素很多,如气相速度、液相速度、油水混合物的含水率、管径、流动方向、液相与管壁间的润湿特性等。本文中结合油-气-水三相管流流动型态,主要讨论液相中入口体积含水率、气相折算速度以及液相折算速度对水平管压力梯度的影响。

2.1 入口体积含水率的影响

图3中给出了高、低两种折算液速(v_{sl})时不同折算气速(v_{sg})下液相中入口体积含水率对压力梯度的影响趋势。

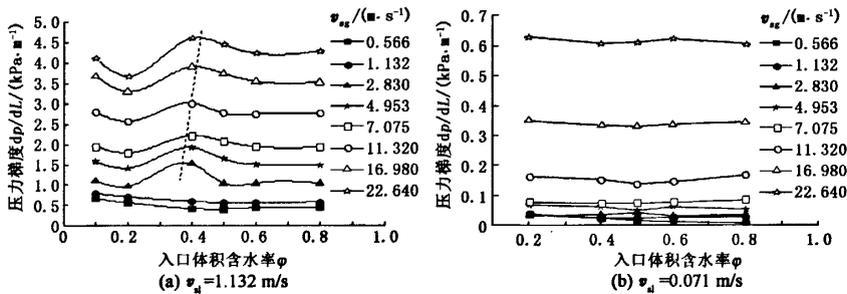


图3 液相中入口体积含水率对压力梯度的影响

Fig.3 Influence of input water cut in liquid on pressure gradient

由图3可以看出,在高折算液速时,压力梯度的变化趋势很复杂,反映了油-气-水三相流动的复杂性。压力梯度呈现出一个明显的变化特征,就是在较高气速(v_{sg} > 2.0 m/s)时,压力梯度出现了峰值

特性,峰值对应的液相中入口体积含水率随着折算气速的增大而增大(图3(a)中虚线所示),在40%左右小幅波动,可以粗略断定三相流动中油水两相的转相点对应的入口体积含水率为40%左右。在

这个区域内,油水混合物有效黏度反常增高使得压力梯度增大。在低气速($v_{sg} < 2.0 \text{ m/s}$)时,没有出现压力梯度的峰值特性。在气体扰动作用影响下,油-气-水三相流动转相对应的人口体积含水率(约为 40%)明显低于油水两相流动时的转相点入口体积含水率(约为 60%)^[6]。油-气-水三相流动的转相点与折算气速、折算液速以及液相中入口体积含水率均有关。

低折算液速时,压力梯度的变化不同于高折算液速的情况。在各折算气速的工况下,压力梯度没有出现峰值特性。压力梯度的变化与管内流体的流动型态密切相关。

图 3(b)的变化特点也表明,低液速时不同折算气速下随液相中入口体积含水率的增加,压力梯度

的变化幅度不大,说明在低折算液速时,液相中入口体积含水率对压力梯度的影响不大。

表 1 中给出了图 3(b)工况下不同折算气速时随液相中入口体积含水率变化的压力梯度相对误差变化。

由表 1 可以看出,不同入口体积含水率时压力梯度最大相对误差的绝对值为 4.296%,因此可以做出如下判断:该工况下油气水三相流动的压力梯度可以忽略液相中入口体积含水率的影响,可以采用气液两相的压降计算方法近似计算油气水三相流动的压力梯度。对不同试验工况的误差分析表明,在小混合液量(折算液速 $v_{sl} < 0.142 \text{ m/s}$)工况下均可以做此简化处理。

表 1 不同折算气速下各入口体积含水率下的压力梯度相对误差

Table 1 Pressure gradient relative error under different gas superficial velocity and input water cut in liquid

入口体积含水率 $\varphi/\%$	折算气速 $v_{sg}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$							
	0.566	1.132	2.83	5.66	11.32	16.98	19.81	22.64
20	1.955	0.554	1.333	-1.252	0.695	2.721	1.129	1.716
40	-0.042	-1.471	0.203	-3.123	-1.440	-2.321	0.713	-0.769
50	-1.019	-2.463	0.257	-1.892	-0.955	-2.312	-2.601	-1.434
60	-0.043	-1.472	-0.353	-4.296	-0.352	-0.592	-0.399	2.554
80	-0.909	-2.351	1.926	-3.919	1.976	2.269	1.061	-2.239

2.2 折算气速的影响

图 4 中给出了折算液速为 0.071, 1.132 m/s 两

种工况下,在不同入口体积含水率时折算气速对压力梯度的影响。

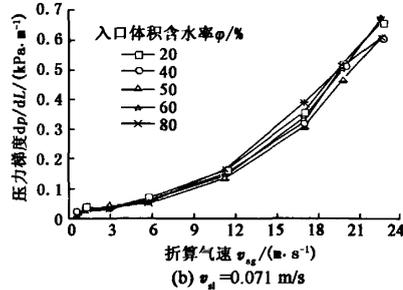
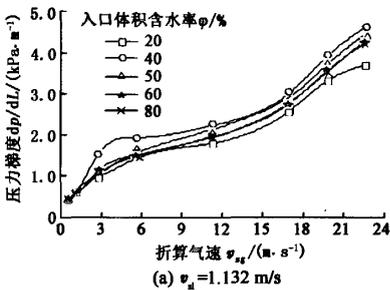


图 4 不同入口体积含水率下折算气速对压力梯度的影响

Fig. 4 Influence of gas superficial velocity on pressure gradient at different input water cut in liquid

两种折算液速下,不同入口体积含水率对应的压力梯度总的变化趋势相同,即随着折算气速的增大,压力梯度递增。但是,高折算液速时的变化明显复杂于低折算液速的工况。在高折算液速时,入口体积含水率为 40% 所对应的压力梯度均高于其他含水率时的压力梯度,这是因为入口体积含水率 40% 对应着该折算液速工况下的转相点,此时的油水混合液的黏度最大,因而压力梯度高于其他含水

率工况。当折算气速小于 1.2 m/s 时,入口体积含水率 20% 对应的压力梯度高于其他体积含水率时的工况,而当折算气速大于 1.2 m/s 时,入口体积含水率 20% 对应的压力梯度低于其他体积含水率时的工况。各入口体积含水率下对应的压力梯度都介于 20% ~ 40% 入口体积含水率对应的压力梯度范围内,且含水率大于 60% 时,含水率的变化对压力梯度的影响不大。该变化现象与图 3(a)的描述一

致。在液相折算速度为 0.849 m/s 的工况也发现了类似的规律。对于 20% 入口体积含水率下对应的压力梯度低于其他含水率的工况,原因尚未清楚,有待于进一步深入研究。

图 5 是油水比为 1:1 时各折算液速下压力梯度与折算气速的变化关系。图 5 表明,压力梯度随着气、液相折算速度的增加而增大。

在液流速都比较低且油水分层和部分混合分布的工况下,虽然有间歇流动出现(IN || ST),但由于形成的液塞较长、流动速度较慢且段塞周期较长,且气体对油水流动形态影响很小,因而压力梯度随着折算气速的增大有轻微的升高,该区域内的压力升高主要是气体流量增加的结果。当气相折算速度大于 2.0 m/s 时,出现了油、水充分混合的段塞流动(IN || DO/W),折算气速的增大使得气体对油水的扰动加强,油水两相由分层流动状态转为 DW/O 和 DO/W(油包水层与分散油滴层两层分层)混合流动,促使混合液体的有效黏度增大,因而压力梯度增幅加快。

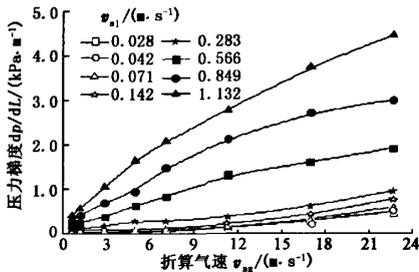


图 5 各折算液速下压力梯度与折算气速关系

Fig. 5 Relation of pressure gradient and gas superficial velocity for different liquid superficial velocity

折算液速较高时,在折算气速小于 7.0 m/s 的试验工况下,气体的强烈扰动作用使管内流体的流动经历了由 IN || ST 流型到 IN || DO/W 流型的过渡,油水分布由分层转为分散,但此时分散油滴的分布沿径向存在着浓度梯度且油滴粒径较大,近管壁处液滴浓度较大,使得液相与管壁的摩擦阻力增大,因而压力梯度升高速度较快。当折算气速大于 7.0 m/s 时,气体的扰动作用使得混合液相中油滴的分布趋于一致且粒径变小,油水混合物的有效黏度降低,与管壁的摩擦阻力减小,从而压力梯度的升高速度趋缓。折算液速越小,折算气速对压力梯度的影响越小。

2.3 折算液速的影响

图 6 反映了油水比为 1:1 时各折算气速下折算

液速对压力梯度的影响。

由图 6 可以看出,压力梯度随着折算液速的增加也是单调递增,不同折算气速下压力梯度随折算液速的变化均呈现 Boltzman 曲线的变化趋势。折算气速越小,折算液速对压力梯度的影响越小。

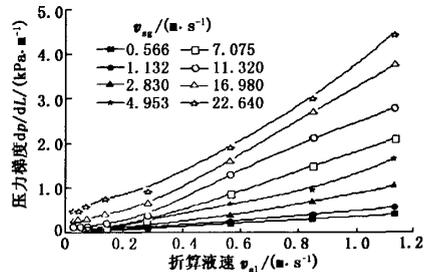


图 6 不同折算气速下压力梯度与折算液速关系

Fig. 6 Relation of pressure gradient and liquid superficial velocity for different gas superficial velocity

3 模型预测与试验结果对比

均相流模型和分相流模型预测水平管路两相流动的压力梯度被证明具有一定的适用范围。Ferguson 等建议^[7],在油-气-水三相流动体系中,当油水两相混合成均一的液相时,气-液两相流的一些模型^[8-13]可用来预测油-气-水三相流动的压力梯度。也有学者认为^[1],目前的气-液两相流的经验关系式不适合预测油-气-水三相流动的压力梯度,建议根据动量平衡模型来寻求合适的预测方法,Taitel 等^[1]成功运用该模型分析了油-气-水三相分层流动。

本文中利用通用的 Lockhart & Martinelli 气液两相模型^[14]预测了 AN || O/W(气液间为环状流动,油水两相混合为均一的油包水混合液)和 IN || O/W(气液间为间歇流动,油水两相混合为均一的水包油混合液)两种流型下油-气-水三相管流的压力梯度,并与试验结果进行了对比,见图 7。油水混合物的黏度采用 Brinkman 黏度模型^[15]确定。

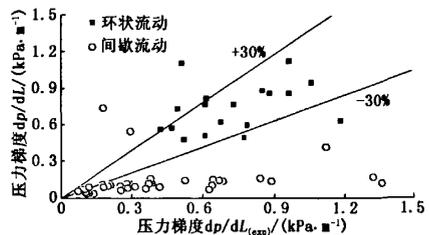


图 7 模型预测与试验结果的对比

Fig. 7 Comparison between model prediction result and experimental data

图7的对比结果表明,对于AN || O/W流型,除了部分数据点(反相点附近的工况)位于 $\pm 30\%$ 边界之外,大部分都位于 $\pm 30\%$ 变化范围之内,因而Lockhart & Martinelli模型可以用来预测AN || O/W流型的三相流动压力梯度;对于IN || O/W流型,压力梯度的预测值大大低于试验测量值,预测结果失败。应用Lockhart & Martinelli模型来预测油-气-水三相流动要进行必要的改进,其中关键就是要获得具有实际意义的混有油相的液-壁剪切应力以及液-气剪切应力的表达式。

4 结论

(1) 折算液速一定时,随着折算气速的增大,不同液相含水率下的压力梯度是递增变化的。各入口体积含水率下对应的压力梯度都介于 $20\% \sim 40\%$ 入口体积含水率对应的压力梯度范围内。

(2) 液相含水率一定时,压力梯度均随着气液相折算速度的增加而增大。不同折算气速下的压力梯度随着折算液速的增加单调递增,且均与Boltzman曲线的变化趋势吻合。

(3) 高折算液速时,在较高折算气速下($v_{sg} > 2.0 \text{ m/s}$),随着液相含水率的增加,压力梯度具有峰值特性,可以粗略断定油-气-水三相流动的反相点对应的液相入口体积含水率为 40% 。低气速($v_{sg} < 2.0 \text{ m/s}$)及低折算液速时,随着液相含水率的增加,压力梯度没有表现出峰值特性,且压力梯度的变化幅度不大。油-气-水三相流动转相的发生与折算液速、折算气速和液相含水率均有关。

(4) Lockhart & Martinelli两相模型可以用来预测AN || O/W流型的油-气-水三相流动压力梯度,而对于IN || O/W流型,压力梯度的预测值大大低于试验测量值,预测结果失败。应用气液两相模型来预测油-气-水三相流动要进行必要的改进。

参考文献:

- [1] TAITEL Y, BARNEA D, BRILL J P. Stratified three phase flow in pipes[J]. Int J Multiphase Flow, 1995,21(1):53-60.
- [2] STAPELBERG H H, MEWES D. The pressure loss and slug frequency of liquid-liquid-gas slug in horizontal pipes [J]. Int J Multiphase Flow, 1994,20(2):285-303.
- [3] HEWITT G F, KHOR S K, PAN L. Three-phase gas-liquid-liquid flow; flow pattern, holdups and pressure drop; proc of Int Symp on Multiphase Flow, 1997 [C]. Beijing: International Academic Publishers, c1997.
- [4] ODOZU U A. Three-phase gas/liquid/liquid slug flow [D]. London: Imperial College, 2000.
- [5] ODOZI U A, MDNDES-Tatsis M A, HEWITT G F. Pressure drop and liquid holdup in three-phase air-oil-water slug flow; 3rd International Conference Multiphase Flow, 1998 [C]. Lyon, c1998.
- [6] 王海琴. 水平管油水两相和油气水三相流动特性研究 [D]. 东营: 中国石油大学机电工程学院, 2008.
- [7] FERGUSON M E G, SPEDDING P L. Measurement and prediction of pressure drop in two phase flow [J]. J Chem Technol Biotechnol, 1995,62:262-278.
- [8] FAYED A S, OTTEN L. Comparing measured and calculated multiphase flow pressure drop [J]. Oil Gas J, 1983,8:136-144.
- [9] GREGORY G A, FROGASSI M. A critical evaluation of multiphase gas liquid pipeline calculation methods; Int Conf Multiphase Flow, 1995 [C]. London: c1995.
- [10] SPEDDING P L, BERARD E, DONNELLY G F. Prediction of pressure drop in multiphase horizontal pipe flow [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2006,33(9):1053-1062.
- [11] DUKLER A E, WICKS M, CLEVELAND R G. Pressure drop and hold-up in two-phase flow [J]. AIChEJ, 1964,10:38-51.
- [12] BEGGS H D, BRILL J P. A study of two phase flow in inclined pipes [J]. Trans Pet Soc AIME, 1973,25:607-617.
- [13] BEATTIE D R H, WHALLEY P B. A simple two phase friction pressure drop calculation method [J]. Int J Multiphase Flow, 1982,8:83-87.
- [14] LOCKHART R W, MARTINELLI R C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component in pipes [J]. Chem ENG Proce, 1949,45(1):39-48.
- [15] BRINKMAN H C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions [J]. J Chem Phys, 1975,20:571-594.

(编辑 沈玉英)