Journal of Oil and Gas Technology 石油天然气学报, 2016, 38(1), 40-47
Published Online March 2016 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/jogt
http://dx.doi.org/10.12677/jogt.2016.381006

Hans汉斯

Modification of Beggs-Brill Pressure Gradient Predicting Model for Multiphase Flow in Vertical Wells

Yong Dong[1,2], Mengxia Li[1,2,3], Ruiquan Liao[2,3], Wei Luo[2,4]

[1]School of Information and Mathematics, Yangtze University, Jingzhou Hubei
[2]Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Yangtze University), Ministry of Education, Wuhan Hubei
[3]School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan Hubei
[4]School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan Hubei
Email: dongyong80@126.com

Received: Sep. 20th, 2015; accepted: Jan. 9th, 2016; published: Mar. 15th, 2016

Copyright © 2016 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

Abstract

Beggs-Brill Model was a representative one for calculating pressure gradient. There was a large difference between the pressure gradient calculated by Beggs-Brill method and the pressure gradients measured in experiments of multiphase flow in vertical tubing. By comparing the predicting deviations between Beggs-Brill model and experimental apparatus, it was considered that the predicted deviation using Beggs-Brill Model was closely related with the parameters of gas-liquid ratio. And then combining the correlation method with Beggs-Brill Model, a two-regression model based on the deviation of Beggs-Brill Model was established, and in combination with the 2 models, a new pressure gradient predicting method named BBM model was built. The results for 90 groups of experimental data show that the average relative error of BBM method is 6.07% and the one of Beggs-Brill method is 21.56%. Based on the known data with 30% and 90% water contents, BBM model is to predict the pressure gradients at 60% water content, and compared with the BBM gradients with the experimental pressure gradient, the average relative error of BBM modle is 15.86%, which is 3.7% higher than that of Beggs-Brill model. The results show that the BBM model improves the predicting precision of pressure gradient for multiphase flow in vertical wells; it is beneficial for improving the reliability of design and dynamic analysis of oil and gas wells.

Keywords

Multiphase Flow, Pressure Gradient, Prediction, Beggs-Brill Model

文章引用: 董勇, 李梦霞, 廖锐全, 罗威. 垂直井筒中多相流动的 Beggs-Brill 压力梯度预测模型的改进[J]. 石油天然气学报, 2016, 38(1): 40-47. http://dx.doi.org/10.12677/jogt.2016.381006

垂直井筒中多相流动的Beggs-Brill压力梯度预测模型的改进

董　勇[1,2]，李梦霞[1,2,3]，廖锐全[2,3]，罗　威[2,4]

[1]长江大学信息与数学学院，湖北 荆州
[2]教育部油气资源与勘探技术重点实验室(长江大学)，湖北 荆州
[3]长江大学石油工程学院，湖北 武汉
[4]长江大学地球科学学院，湖北 武汉
作者简介：董勇(1980-)，男，博士，讲师，现主要从事演化算法、测井资料解释方面的工作。
Email: dongyong80@126.com

收稿日期：2015年9月20日；录用日期：2016年1月9日；发布日期：2016年3月15日

摘　要

Beggs-Brill模型是具有代表性的压力梯度计算模型，但存在预测的多相管流压力梯度偏差过大的问题。通过对比Beggs-Brill模型的预测误差与试验设置的参数，认为Beggs-Brill模型预测误差与气液比参数关系密切，建立了Beggs-Brill模型预测误差关于气液比的二次回归模型，并结合该回归模型与Beggs-Brill模型，建立了一种新的压力梯度预测方法，即BBM模型。对90组试验数据的处理结果表明，BBM模型的预测平均相对误差为6.07%，而Beggs-Brill模型的预测平均相对误差为21.56%。以试验中含水率30%、90%的情况为已知数据，采用BBM模型预测含水率60%时的压力梯度，与试验测试压力梯度比较的平均相对误差为15.86%，比Beggs-Brill模型提高了3.7%。BBM模型提高了多相管流压力梯度预测的精度，有助于提高油气井设计和分析的可靠性。

关键词

多相流，压力梯度，预测，Beggs-Brill模型

1. 引言

多相管流压力梯度预测是油气井设计和分析的重要理论基础，前人做了大量工作[1]-[5]。其中，BB模型(Beggs-Brill 压力梯度预测模型) [6]能够适用于各种倾斜程度的井筒，得到了广泛应用，是一种具有代表性的压力梯度计算模型。但基于笔者试验测试数据的处理结果表明，BB 模型计算的压力梯度与测试压力梯度的平均相对误差 21.56%，有必要进一步研究 BB 模型，建立改进的计算模型。

首先用 BB 模型计算试验条件下的压力梯度(BB 梯度)，利用 BB 梯度减去测试压力梯度，得到 BB 预测误差。然后分析 BB 预测误差和试验条件之间的关系，建立了以气液比为自变量的 BB 预测误差的二次回归模型(PEM 模型)。最后结合 PEM 和 BB 模型，得到了一种新的压力梯度预测模型(BBM 模型)。计算结果表明，BBM 模型更加符合实测压力梯度。

2. BB 模型预测效果

试验测试的数据如下：垂直管液流量 10~50 m^3/d，气液比 50~300 m^3/m^3，测试温度 14℃~17℃，介

质是空气、5#白油、自来水，压力梯度 5.16~28.77 hPa/m，试验数 90 组(管径 75 mm，含水率 30%、60%、90%)。粗糙度取 0.0002 mm。以含水率 30%为例，对比 BB 模型计算的压降如图 1 所示。BB 模型计算压降值大部分较测试压降值偏大，平均绝对误差为 2.69 kPa，平均相对误差为 22.1%。

为了改进压力梯度预测模型，继续分析 BB 模型预测误差的规律性，将预测误差分别与气流量、液流量、测试压力梯度、BB 模型计算压力梯度对比，如图 2 所示。序号 1~5 对应设计液流量 10 m^3/d，序号 6~10 对应设计液流量 15 m^3/d，序号 11~15 对应设计液流量 20 m^3/d，序号 16~20 对应设计液流量 30 m^3/d，序号 21~25 对应设计液流量 40 m^3/d，序号 26~30 对应设计液流量 50 m^3/d。序号 1、6、11、16、21、26 对应气液比为 50 m^3/m^3，序号 2、7、12、17、22、27 对应气液比为 100 m^3/m^3，序号 3、9、13、18、23、28 对应气液比为 150 m^3/m^3，序号 4、9、14、19、24、29 对应气液比为 200 m^3/m^3，序号 5、10、15、20、25、30 对应气液比为 300 m^3/m^3。为了方便对比变量的变化规律，对液流量、气流量分别做了转化，转化关系为液流量乘以 10，气流量乘以 0.01。

从图 2 可以看出，当设计液流量相同时，对于不同含水率，预测误差关于气液比的变化规律具有一定的相似性；当含水率固定时，不同的液流量对应的预测误差曲线几何形状差别较大，但基本都具备二次曲线的特征。因此，可以使用二次曲线形式来对预测误差建模。

3. BBM 模型

根据前述分析，采用二次函数形式拟合预测误差，所得模型即 PEM 模型如下：

$$y_i = ax_i^2 + bx_i + c \tag{1}$$

式中：x_i 为气液比，m^3/m^3；y_i 为预测误差，hPa/m；$i = 1,2,\cdots,5$；a、b、c 为待定拟合系数。

BBM 模型预测压力梯度为：

$$V_{BBM} = V_{BB} - V_{PEM} \tag{2}$$

式中：V_{BBM} 为 BBM 模型计算的压力梯度值，hPa/m；V_{BB} 为 BB 模型计算的压力梯度值，hPa/m；V_{PEM} 为根据预测误差拟合模型计算的压力梯度值，hPa/m。

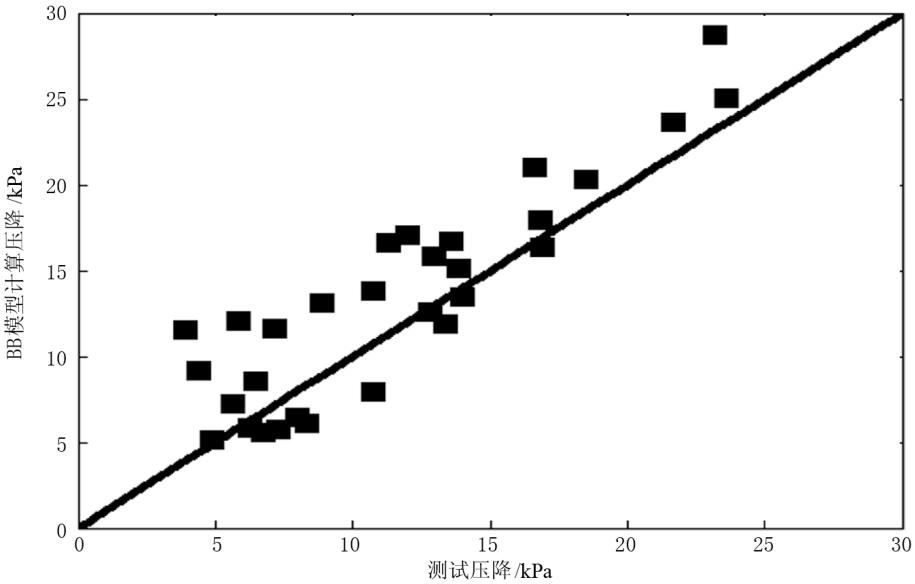

Figure 1. Comparison between the calculated pressure drop and the test pressure drop
图 1. BB 模型计算压降值与测试压降值的对比

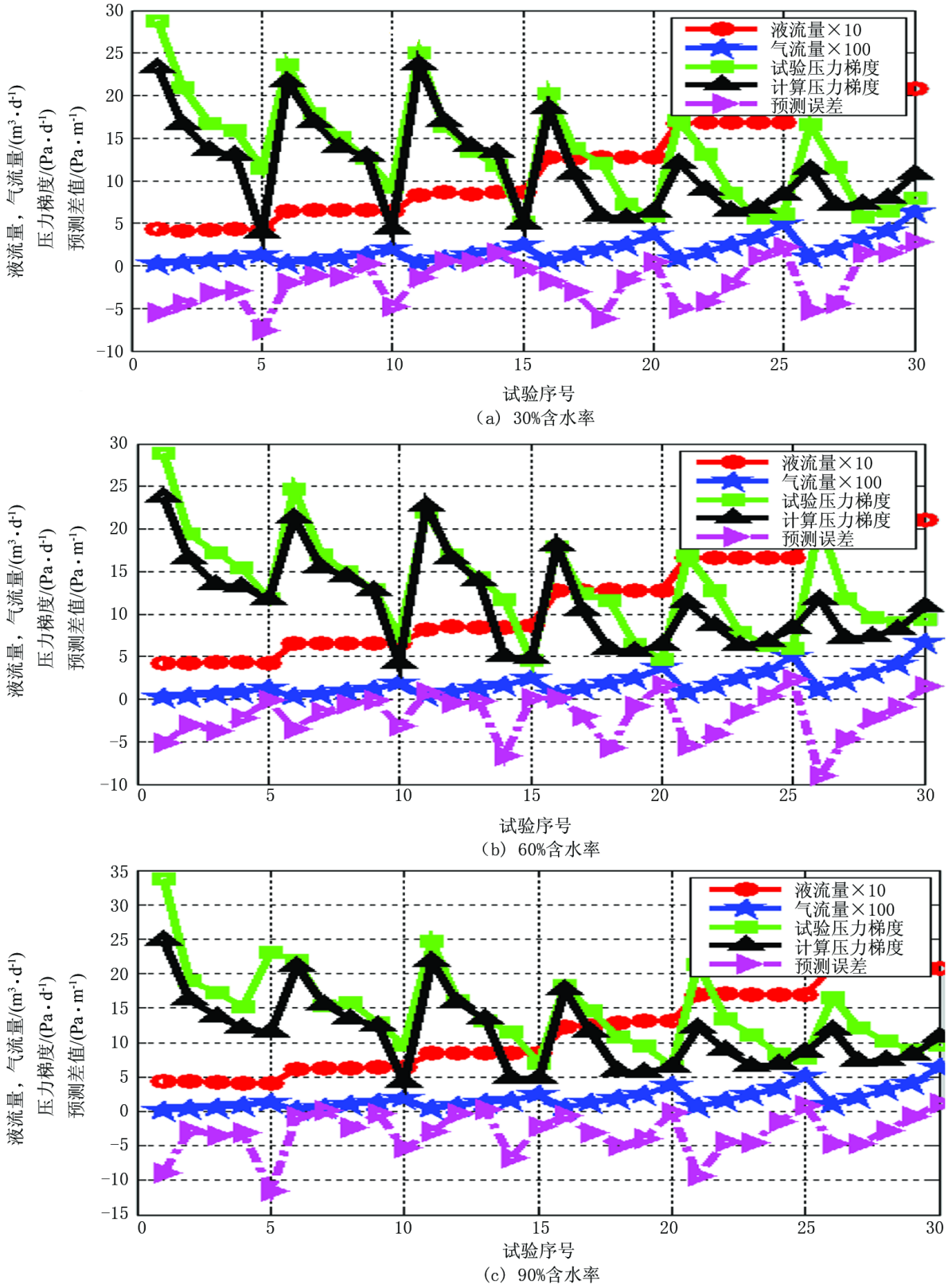

Figure 2. Regularity of prediction error of BB model
图 2. BB 模型预测误差的规律性

BBM 预测压力梯度与试验压力梯度的相对误差 E 定义为：

$$E = \frac{|V_{BBM} - V_E|}{V_E} \tag{3}$$

式中：V_E 为试验记录的压力梯度，hPa/m。

首先给定含水率和液流量(取决于试验方案)，将给定含水率和液流量对应的气液比、预测偏差值构成二元数组，即(x_i, y_i)；然后使用最小二乘法，确定出公式(1)中待定系数的值。不同的含水率、液流量组合下的 BBM 预测偏差曲线的几何形态是不同的，因此公式(1)中的待定系数也不会相同，必须依据试验测试压力梯度数据分别进行拟合来确定系数 a、b、c。

BBM 模型中，BB 模型是完整引用的，对于不同的倾斜角度、含水率、液流量、气液比都是可以使用的。假设已经根据试验数据，确定了试验条件下的 PEM 模型，但还需要确定其他含水率、液流量、气液比情形下的偏差修正值。笔者采用线性插值方法解决这一问题，并将插值方法得到的压力梯度值称为非试验条件下 PEM 预测压力梯度。

试验数据中含水率的上限为 F_{WU}，下限为 F_{WD}；液流量的上限为 Q_{LU}，下限为 Q_{LD}；气液比的上限记为 R_{GLU}，下限记为 R_{GLD}；含水率 F_W；液流量 Q_L；气液比 R_{GL}。

步骤 1：若 F_W、Q_L、R_{GL} 满足 $F_{WD} \le F_W \le F_{WU}$，$Q_{LD} \le Q_L \le Q_{LU}$，$R_{GLD} \le R_{GL} \le R_{GLU}$，则转步骤 2；否则，终止程序，输出：“超出本方法支持的参数范围”。

步骤 2：针对试验记录的含水率、液流量数据，选出与 F_W 紧邻的 2 个含水率，记为 F_{W1}、F_{W2}，满足 $F_{W1} \le F_W \le F_{W2}$；选出与液流量 Q_L 紧邻的 2 个液流量，记为 Q_{L1}、Q_{L2}，满足 $Q_{L1} \le Q_L \le Q_{L2}$。则记录 F_{W1}、Q_{L1} 对应的 PEM 模型为 f_{11}；F_{W1}、Q_{L2} 对应的 PEM 模型为 f_{12}；F_{W2}、Q_{L1} 对应的 PEM 模型为 f_{21}；F_{W2}、Q_{L2} 对应的 PEM 模型为 f_{22}。

步骤 3：根据 f_{11}、f_{12}，利用线性插值方法确定含水率为 F_{W1}，且液流量为 Q_L 时的偏差预测模型，记为 f_1。

$$f_1 = \frac{Q_{L2} - Q_L}{Q_{L2} - Q_{L1}} f_{11} + \frac{Q_L - Q_{L1}}{Q_{L2} - Q_{L1}} f_{12} \tag{4}$$

类似，根据 f_{21}、f_{22}，确定含水率为 F_{W2}，且液流量为 Q_L 时的偏差预测模型，记为 f_2。

$$f_2 = \frac{Q_{L2} - Q_L}{Q_{L2} - Q_{L1}} f_{21} + \frac{Q_L - Q_{L1}}{Q_{L2} - Q_{L1}} f_{22} \tag{5}$$

步骤 4：根据 f_1、f_2，利用线性插值方法确定含水率为 F_W，且液流量为 Q_L 时的偏差预测模型，记为 f。

$$f = \frac{F_{W2} - F_W}{F_{W2} - F_{W1}} f_1 + \frac{F_W - F_{W1}}{F_{W2} - F_{W1}} f_2 \tag{6}$$

步骤 5：将气液比 R_{GL} 代入公式(6)，得到 F_W，Q_L，R_{GL} 情形下的 BB 模型预测误差的拟合值，记为 f_0；BB 模型的预测值减去 f_0 即为 BBM 模型的预测值。

4. BBM 模型的验证

从 2 个方面对 BBM 模型进行验证。第 1 个方面，针对试验设置条件，分析 BBM 模型的预测精度；第 2 个方面，以含水率为 30%、90%为已知数据，按照 BBM 模型计算 60%含水率情形下的预测压力梯度，将其和测试压力梯度数据对比。

试验设置条件：垂直管，内径 75 mm。

对第 1 个方面验证过程，用公式(3)所示的相对误差衡量，结果如表 1 所示。90 组数据中有 14 组数据的 BBM 模型预测相对误差超过 10%，最大相对误差 34.08%；含水率为 30%、60%、90%对应的平均相对误差分别为 6.09%、5.97%、6.16%，90 组数据的平均相对误差为 6.07%。根据文献[6]容易算出，BB 模型在含水率为 30%、60%、90%对应的预测相对误差分别为 22.09%、19.56%、23.03%，平均相对误差为 21.56%。因此对于试验设置条件而言，BBM 模型优于 BB 模型。

对第二种验证过程，含水率为 30%、90%的数据按照第 2 节叙述的过程，通过插值的方法计算出含水率 60%情形下的预测误差值，按公式(6)得到含水率 60%下的 BBM 压力梯度预测值，由公式(3)计算相对误差(记为非试验条件下 BBM 预测相对误差)，结果对比如表 2 所示。30 组试验数据中，与试验测试压力梯度比较的平均相对误差为 15.86%，但有 6 组数据 BBM 模型预测的精度较 BB 模型差，原因在于含水率间隔过大，加密试验设置的含水率条件，有助于提高 BBM 模型预测精度。但对比平均相对误差，BBM 模型的预测精度比 BB 模型的高 3.7%。

Table 1. Prediction of BBM model
表 1. BBM 模型预测效果

含水率/%	液流量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	预测相对误差/1
30	10	E = (0.0106, 0.0255, 0.0059, 0.0287, 0.0110)
	15	E = (0.0132, 0.0148, 0.0565, 0.0815, 0.0243)
	20	E = (0.0041, 0.0236, 0.0383, 0.0217, 0.0050)
	30	E = (0.0093, 0.0339, 0.1817, 0.2606, 0.0592)
	40	E = (0.0322, 0.0631, 0.0634, 0.1959, 0.0447)
	50	E = (0.0415, 0.1602, 0.2646, 0.0423, 0.0088)
60	10	E = (0.0130, 0.0485, 0.0368, 0.0003, 0.0052)
	15	E = (0.0029, 0.0044, 0.0110, 0.0166, 0.0065)
	20	E = (0.0439, 0.0469, 0.1891, 0.2760, 0.1513)
	30	E = (0.0131, 0.0355, 0.2025, 0.3167, 0.0817)
	40	E = (0.0168, 0.0445, 0.0116, 0.0449, 0.0161)
	50	E = (0.0366, 0.1244, 0.0129, 0.0947, 0.0287)
90	10	E = (0.0168, 0.0759, 0.0586, 0.0034, 0.0037)
	15	E = (0.0005, 0.0383, 0.1034, 0.0964, 0.0216)
	20	E = (0.0592, 0.1051, 0.2135, 0.3408, 0.1285)
	30	E = (0.0018, 0.0097, 0.0503, 0.0468, 0.0122)
	40	E = (0.0255, 0.1070, 0.0984, 0.0161, 0.0089)
	50	E = (0.0280, 0.0679, 0.0128, 0.0761, 0.0197)

Table 2. Accuracy of predict the pressure gradient between the BBM model and BB model
表 2. BBM 模型预测压力梯度与 BB 模型预测压力梯度的精度对比

液流量 /($m^3 \cdot d^{-1}$)	气液比/1	BB 模型预测相对误差/1	非试验条件 BBM 模型预测相对误差/1
10	50	0.1786	0.0673
	100	0.1558	0.0510
	150	0.2176	0.0587
	200	0.1422	0.0680
	300	0.0100	0.8022
15	50	0.1400	0.0772
	100	0.0928	0.0539
	150	0.0406	0.0041
	200	0.0107	0.0826
	300	0.4257	0.2332
20	50	0.0347	0.0999
	100	0.0268	0.0281
	150	0.0194	0.0304
	200	0.5693	0.5043
	300	0.0304	0.3958
30	50	0.0071	0.0804
	100	0.1599	0.1131
	150	0.4926	0.1260
	200	0.1351	0.4686
	300	0.3602	0.2835
40	50	0.3285	0.0974
	100	0.3232	0.0426
	150	0.1891	0.1303
	200	0.0587	0.1740
	300	0.3997	0.1245
50	50	0.4367	0.1673
	100	0.3930	0.1178
	150	0.2275	0.0903
	200	0.0987	0.1233
	300	0.1627	0.0613
相对误差平均值		0.1956	0.1586

5. 结论

1) 建立 Beggs-Brill 模型预测误差关于气液比的二次回归模型，结合回归模型与 Beggs-Brill 模型，建立了一种新的压力梯度预测方法，即 BBM 模型。

2) BBM 模型的预测平均相对误差为 6.07%，而 Beggs-Brill 模型的预测平均相对误差 21.56%。

3) 以试验中含水率 30%、90%的情况为已知数据，采用 BBM 模型预测含水率 60%时的压力梯度，与试验测试压力梯度比较的平均相对误差为 15.86%，比 Beggs-Brill 模型提高了 3.7%。

基金项目

湖北省教育厅科学技术研究项目(B2015449)。

参考文献 (References)

[1] 周瑞立, 周舰, 罗懿, 等. 低渗产水气藏携液模型研究与应用[J]. 岩性油气藏, 2013, 4(4): 123-128.

[2] 田相雷, 蒋海岩, 岳艳如, 等. 气举排水采气生产规律研究[J]. 断块油气田, 2013, 19(6): 760-763.

[3] 白晓弘, 田伟, 田树宝, 等. 低产积液气井气举排水井筒流动参数优化[J]. 断块油气田, 2014, 21(1): 125-128.

[4] 田云, 王志彬, 李颖川, 等. 速度管排水采气井筒压降模型的评价及优选[J]. 断块油气田, 2015, 22(1): 130-133.

[5] Musaab, M.A. and Ayoub, M.A. (2014) A Comprehensive Study on the Current Pressure Drop Calculation in Multi-phase Vertical Wells; Current Trends and Future Prospective. *Journal of Applied Sciences*, **14**, 3162-3171. http://dx.doi.org/10.3923/jas.2014.3162.3171

[6] Beggs, D.H. and Brill, J.P. (1973) A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes. *Journal of Petroleum Technology*, **25**, Document ID: SPE4007. http://dx.doi.org/10.2118/4007-pa