

# 提高胍胶压裂液摩阻计算精度的方法

袁海平<sup>1</sup>, 陶长州<sup>1</sup>, 高 燕<sup>1,2</sup>, 夏玉磊<sup>1</sup>

(1. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司, 陕西西安 710021; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西咸阳 712000)

**摘 要:** 目前计算胍胶压裂液摩阻采用的降阻比经验公式系数求取困难, 摩阻计算精度低, 与实际摩阻相差较大。采用试验和理论相结合的方法对摩阻计算方法进行了改进: 根据室内小管径胍胶压裂液摩阻试验结果, 采用拟合方法建立流速与降阻比的关系式, 再利用流速与降阻比的关系式计算不同管径和流速下胍胶压裂液的摩阻。通过室内试验和现场实测摩阻验证了胍胶压裂液摩阻计算改进方法的准确性, 结果表明, 与传统经验公式方法相比, 改进方法降低了求取经验公式系数的难度, 提高了胍胶压裂液摩阻的计算精度, 改进方法计算的摩阻与实测摩阻的平均相对误差不超过 16%, 而传统经验公式平均相对误差高达 31%。研究结果表明, 摩阻计算改进方法能够提高胍胶压裂液摩阻的计算精度, 可以为压裂设计和施工提供依据。

**关键词:** 压裂液; 胍胶; 摩阻; 降阻比; 拟合; 回归分析

**中图分类号:** TE357.1<sup>+</sup>1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2017)05-0108-05

## A Method to Improve the Accuracy of Friction Calculations for HPG Fracturing Fluid

YUAN Haiping<sup>1</sup>, TAO Changzhou<sup>1</sup>, GAO Yan<sup>1,2</sup>, XIA Yulei<sup>1</sup>

(1. Changqing Downhole Service Company, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Xi'an, Shaanxi, 710021, China; 2. National Engineering Laboratory of Low Permeability Oil and Gas Field Exploration and Development, Xianyang, Shaanxi, 712000, China)

**Abstract:** At present, calculating the fracturing fluid friction is problematic because there are problems with the ratio of drag, e. g. difficult to find the coefficient, low accuracy of friction calculation, large difference between calculated friction and real one, etc. By combining testing and theoretical methods, the friction calculation method has been improved, i. e. through the indoor small pipe friction test of HPG fluid, fitting and establishing the relationship between the flow velocity and the ratio of drag. Later, the formula was given to calculate the friction of HPG fracturing fluid under different pipe diameters and flow velocities. The indoor and field tests showed that the improved method was accurate in calculating the HPG fracturing fluid friction. Compared with the traditional empirical formula method, the improved method can reduce the difficulty of calculating coefficient of the empirical formula, and improves the accuracy of HPG friction calculation. In this case, the average relative error of calculated friction and real friction is less than 16%, while that of the traditional empirical formula is up to 31%. The research results indicates that the improved method can improve the calculation precision of HPG fracturing friction, and provide a basis for fracturing design and operation.

**Key words:** fracturing fluid; HPG; friction; ratio of drag; fitting; regression analysis

近几年随着油气勘探开发的深入, 深井和超深井数量不断增多, 而开发低渗透、超低渗透油气藏和非常规油气藏的深井和超深井需要进行压裂改造, 此时压裂液的摩阻就成为影响压裂施工的主要因素。因此, 在压裂过程中要准确计算压裂液摩阻, 以便指导压裂施工<sup>[1]</sup>。目前, 国内外主要采用降阻比法<sup>[2]</sup>和摩阻系数法<sup>[3]</sup>计算压裂液摩阻。采用经验公式计算降阻比时, 需要确定经验公式中各参数的系数, 而该系数与液体性质有关, 很难准确求取, 采用

前人的经验值又不符合实际, 计算结果与实际偏差较大, 影响后续数据分析<sup>[4]</sup>。实测每种压裂液的摩阻不但成本高, 而且用时长, 不切实际。因此, 笔者在前人的基础上, 采用试验和理论相结合的方法, 根

收稿日期: 2017-01-17; 改回日期: 2017-09-04。

作者简介: 袁海平(1988—), 男, 四川绵竹人, 2011年毕业于成都理工大学石油工程专业, 2014年获中国石油大学(北京)石油与天然气工程专业硕士学位, 工程师, 主要从事试油压裂方面的研究工作。  
E-mail: cj\_yuanhp@cnpc.com.cn。

据室内小管径胍胶压裂液摩阻试验结果, 采用拟合方法得到流速与降阻比的关系式, 再利用流速与降阻比的关系式计算不同管径和流速下胍胶压裂液的摩阻。该方法避免了经验公式系数求取困难的问题, 降阻比的求取更加简单和准确, 计算得到的胍胶压裂液的摩阻与实际摩阻更接近, 满足了压裂施工和压裂数据分析的要求。

## 1 摩阻的经验计算公式

当前压裂施工使用最广泛的是胍胶压裂液, 其具有假塑性非牛顿流体的性质, 一般将其视为幂律流体<sup>[5]</sup>。D. L. Lord 等人<sup>[6]</sup>在大量压裂液管流试验的基础上, 提出了降阻比的概念, 其表达式为:

$$\sigma = \frac{\Delta p_g}{\Delta p_w} \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为降阻比;  $\Delta p_g$  为压裂液的摩阻, MPa;  $\Delta p_w$  为清水摩阻, MPa。

由式(1)可知, 降阻比为在相同管径、排量和管长下压裂液摩阻与清水摩阻之比。从本质上讲, 降阻比就是牛顿流体和非牛顿流体在摩阻方面的表现<sup>[4]</sup>。

清水摩阻的计算公式为<sup>[7]</sup>:

$$\Delta p_w = 1.3866 \times 10^6 D^{-4.8} Q^{1.8} L \quad (2)$$

式中:  $D$  为管柱内径, mm;  $Q$  为流量,  $\text{m}^3/\text{min}$ ;  $L$  为管柱长度, m。

在式(1)的基础上, 杜发勇等人<sup>[2]</sup>进行了不同条件下的胍胶压裂液管流试验, 分析了影响降阻比的因素及其影响规律, 总结出了降阻比与管径、排量和胍胶质量浓度的关系式:

$$\ln \left[ \frac{1}{\sigma} \right] = 1.895 - 1.160 \times 10^{-4} \frac{D^2}{Q} - 0.285 \times 10^{-4} C_g \frac{D^2}{Q} - 0.1639 \ln \frac{C_g}{0.1198} \quad (3)$$

式中:  $C_g$  为胍胶的质量浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

利用式(1)~式(3)可求得实际工况下胍胶压裂液的摩阻, 然而该方法计算误差较大, 对于不同的压裂液需要调整式(3)中的系数。调整式(3)中的系数又需要进行大量的管流试验, 对试验数据进行回归求得系数<sup>[2]</sup>, 但现有文献没有详细介绍回归方法, 导致式(3)中的系数难于求取, 且式(3)没有考虑温度对降阻比的影响<sup>[1]</sup>。

## 2 摩阻计算方法的改进

为了简化降阻比的求取方法, 提高摩阻的计算精

度, 需要建立新的降阻比计算方法。要将室内试验数据用于计算实际工况下的摩阻, 首先要解决室内试验与实际压裂施工所用管径不同的问题, 如能消除管径对降阻比的影响, 就能将根据室内试验结果计算出的降阻比用于计算实际工况下的摩阻<sup>[8]</sup>。由相关文献可知, 摩阻与胍胶质量分数有关, 与添加剂无关, 因此可以忽略添加剂对摩阻的影响<sup>[4,9]</sup>。在进行室内试验时, 可以将胍胶质量分数设为定值, 这样降阻比就仅与流速有关, 将影响降阻比的因素由多因素转化为单因素, 从而降低系数的求取难度。对胍胶质量分数一定的压裂液摩阻试验数据进行处理, 就可以得到不同管径下降阻比与流体平均流速的关系曲线(见图1)。从图1可以看出, 该关系曲线是与管径无关的双曲线<sup>[6]</sup>。

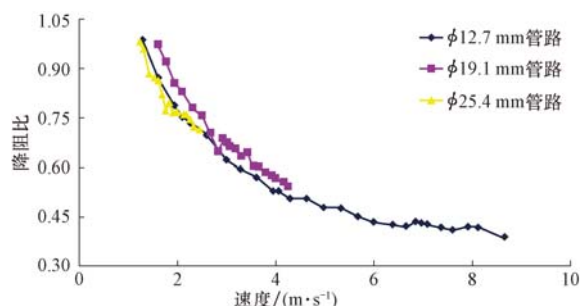


图1 降阻比与流速的关系曲线

Fig. 1 Relationship between ratio of drag and flow velocity

由于降阻比与流体平均流速的关系曲线为双曲线, 因此  $\lg \left[ \frac{1}{\sigma} \right]$  与  $\lg \left[ \frac{1}{v} \right]$  呈线性关系, 两者之间的关系式为:

$$\lg \left[ \frac{1}{\sigma} \right] = A + B \lg \left[ \frac{1}{v} \right] \quad (4)$$

$$v = 21231.42 Q D^{-2} \quad (5)$$

式中:  $v$  为流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $A$  和  $B$  为与管径无关的常量,  $A$  为截距,  $B$  为斜率。

根据室内胍胶压裂液管流试验测得的摩阻按照式(1)计算出不同流速下的降阻比, 然后绘制  $\lg \left[ \frac{1}{\sigma} \right]$  与  $\lg \left[ \frac{1}{v} \right]$  的关系曲线, 对曲线进行回归求得系数  $A$  和  $B$ , 将系数  $A$  和  $B$  代入式(4)进行变换即可得到降阻比和流速的关系式:

$$\sigma = 10^{-A} v^B \quad (6)$$

当要计算胍胶压裂液在实际油管中的摩阻时, 利用式(5)计算出当前施工排量的流速, 代入式(2)和式(6)中计算出该排量下清水摩阻和胍胶压裂液的降阻比, 将计算结果再代入式(1)进行变换, 就可得到胍胶压裂液在该排量下的摩阻:

$$\Delta p_g = \sigma \Delta p_w \quad (7)$$

### 3 室内液体摩阻的测定

#### 3.1 试验设备

采用小型液体流动摩阻测试设备测试液体的摩阻。小型液体流动摩阻测试设备由柱塞泵、流量计、压差传感器、数据采集系统、计算机和3根不同直径( $\phi 12.7$ 、 $\phi 19.1$ 和 $\phi 25.4$  mm)长3.0 m的测试管路构成(见图2)。为了模拟压裂施工时的井底温度,为测试设备加装了恒温控制系统。液体通过柱塞泵输送到测试管路中,柱塞泵的排量由变频器控制,数据采集系统采集压差和流量。

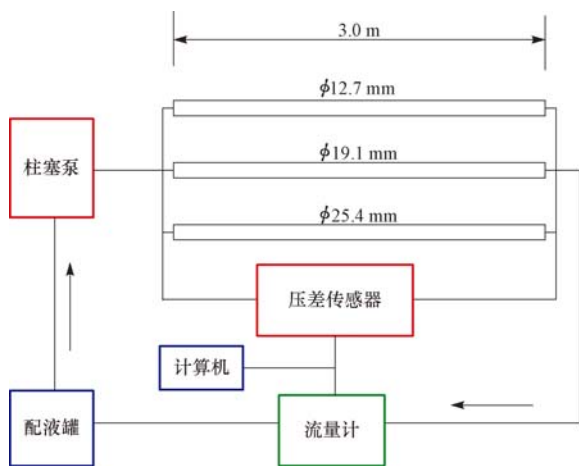


图2 小型液体流动摩阻测试设备示意

Fig. 2 Sketch of small test equipment for liquid flow friction

#### 3.2 试验方法

连接好管线后,将温度升至设定的温度,首先测定清水在3根不同直径管路中不同流量下的摩阻,并与理论计算结果进行对比,以验证设备测试的结果是否准确。然后配制胍胶基液<sup>[10]</sup>,待胍胶完全溶胀后测定胍胶基液以不同流量流过3根不同直径管路时的摩阻。

#### 3.3 试验结果分析

##### 3.3.1 清水摩阻

在直角坐标系下绘制清水流量与测试摩阻和理论摩阻的曲线,结果如图3所示。从图3可以看出,清水的测试摩阻与理论摩阻吻合得较好,说明采用该设备可以准确测试液体的摩阻。另外,从图3还可以看出,随着流量增大,清水的摩阻呈指数增长。

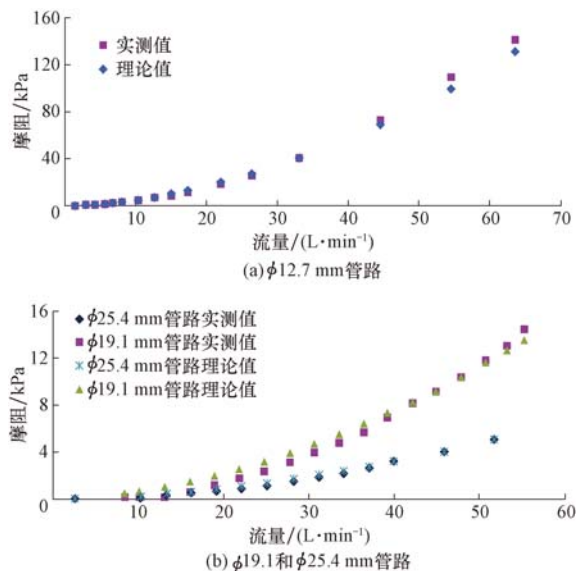


图3 不同直径管路中清水流量与摩阻的关系

Fig. 3 The relationship between fresh water friction and flow rate in different diameters of pipe

##### 3.3.2 0.08%胍胶基液的摩阻

根据质量分数0.08%胍胶基液不同排量下、在不同直径管路中的摩阻,利用式(1)和式(2)计算出不同排量下、不同直径管路中的降阻比,并将流量转换为流速,绘制不同管径下 $\lg\left(\frac{1}{\sigma}\right)$ 和 $\lg\left(\frac{1}{v}\right)$ 的关系曲线,结果如图4所示。从图4可以看出,不同管径下的 $\lg\left(\frac{1}{\sigma}\right)$ 和 $\lg\left(\frac{1}{v}\right)$ 的关系曲线重合,且两者呈线性关系。

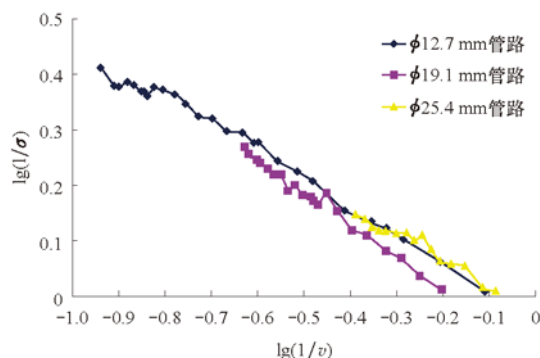


图4 胍胶基液在不同直径管路中流速与降阻比的关系

Fig. 4 The relationship between HPG ratio of drag and flow velocity in different pipe diameters

##### 3.3.3 0.08%胍胶基液的降阻比

对图4中的直线进行回归拟合,求得该直线的斜率A和截距B分别为-0.478 8和-0.028 8,将其代

入式(6), 得到 0.08% 胍胶基液降阻比的表达式为:

$$\sigma = 3.0116 v^{-0.0288} \quad (8)$$

从式(8)可以看出, 流速和降阻比成反比关系, 当流速增大时, 降阻比先快速下降后逐渐变缓。这也说明随着流速增大, 0.08% 胍胶基液的降阻效果逐渐增大, 最后趋于稳定。

将式(2)、式(5)和式(8)代入式(7), 可得到 0.08% 胍胶基液在不同管径和流速下的摩阻表达式:

$$\Delta p_{0.08\%} = 3.1343 \times 10^{12} Q^{1.7712} D^{-4.7424} L \quad (9)$$

采用试验和理论相结合的方法推导不同质量分数胍胶溶液的摩阻表达式, 不但可以克服降阻比经验公式系数求取困难的问题, 而且简化了计算流程。

## 4 改进方法的验证

### 4.1 室内验证

为了检验改进后的摩阻计算方法的准确性, 在 25 °C 下测定了 0.08% 胍胶基液在  $\phi 73.0$  和  $\phi 88.9$  mm 油管中的摩阻, 利用式(9)和式(3)分别计算相同管径下的摩阻, 然后绘制摩阻与排量的关系曲线, 结果见图 5 和图 6。由图 5 和图 6 可知: 改进方法和经验公式计算出的摩阻在排量较小时都与实测摩阻较接近, 误差较小; 随着排量增大, 改进方法计算结果的误差较小, 最大相对误差不超过 15%, 而经验公式计算结果的误差有逐渐增大的趋势。这是因为在排量较小时, 液体的流动为层流, 影响摩阻的因素单一, 计算结果比较准确; 当流速增大时, 流体的流动变成紊流, 影响摩阻的因素增多, 对摩阻的计算变得更加困难<sup>[11]</sup>, 且式(3)中的系数与 0.08% 胍胶基液的性质不匹配, 造成计算结果误差较大。

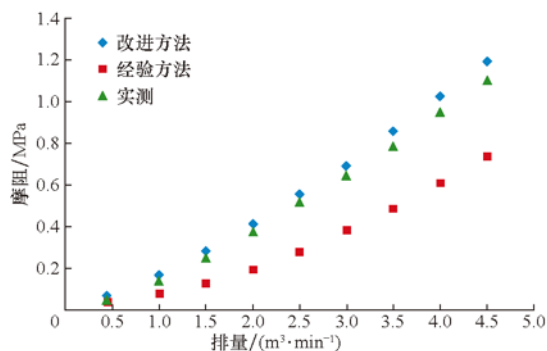


图 5 0.08% 胍胶基液在  $\phi 73.0$  mm 油管中的实测摩阻与计算摩阻

Fig. 5 Comparison of measured friction and calculated friction with 0.08% HPG in  $\phi 73.0$  mm pipe

利用小型液体流动摩阻测试设备在 25 °C 下分别

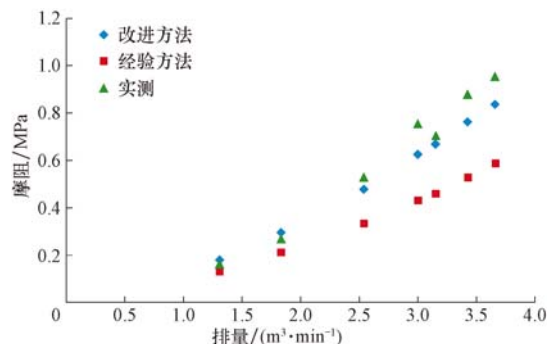


图 6 0.08% 胍胶基液在  $\phi 88.9$  mm 油管中的实测摩阻与计算摩阻

Fig. 6 Comparison of measured friction and calculated friction with 0.08% HPG in  $\phi 88.9$  mm pipe

测试 0.30% 胍胶基液在不同流量下的摩阻, 采用上述改进方法求得 0.30% 胍胶基液在  $\phi 73.0$  和  $\phi 88.9$  mm 油管中的摩阻表达式, 利用其计算 0.30% 胍胶基液不同排量、不同管径中的摩阻, 再利用式(3)计算摩阻, 并将计算结果与实测摩阻进行对比, 结果见图 7 和图 8。从图 7 和图 8 同样可以看出, 随排量增大, 经验公式的计算误差增大, 而改进方法的计算误差较小。

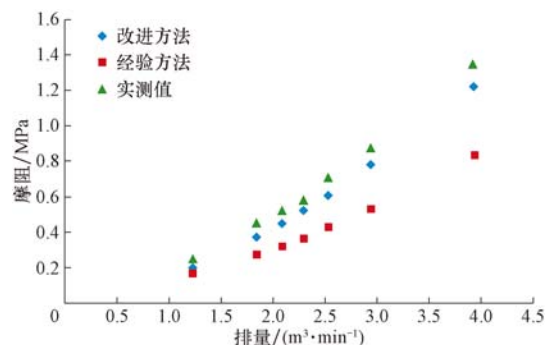


图 7 0.30% 胍胶基液在  $\phi 73.0$  mm 油管中的实测摩阻与计算摩阻

Fig. 7 Comparison of measured friction and calculated friction with 0.30% HPG in  $\phi 73.0$  mm pipe

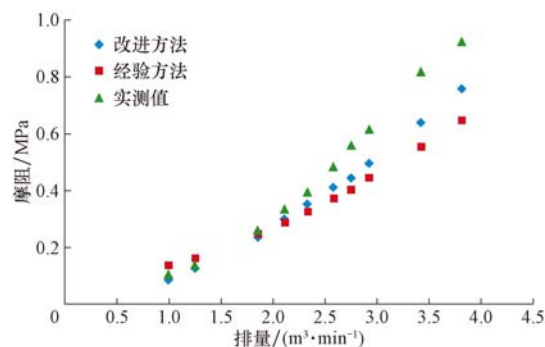


图 8 0.30% 胍胶基液在  $\phi 88.9$  mm 油管中的实测摩阻与计算摩阻

Fig. 8 Comparison of measured friction and calculated friction with 0.30% HPG in  $\phi 88.9$  mm pipe



以上分析说明,通过试验和理论相结合的方法推导不同质量分数胍胶溶液的摩阻表达式,不但可以克服降阻比经验公式系数求取困难的问题,而且可以提高计算精度、简化计算流程。

## 4.2 现场验证

利用 Z107 井实际压裂施工时的实测摩阻对改进方法的准确性进行了验证。将 0.30% 胍胶压裂液泵入 Z107 井  $\phi 73.0$  mm 油管进行压裂,油管下入深度 1 081.00 m。参考邻井压裂过程中的井底温度(33  $^{\circ}\text{C}$ ),在室内利用小型液体流动摩阻测试设备测试 0.30% 胍胶压裂液在 33  $^{\circ}\text{C}$  时不同流量的摩阻,根据上述方法求得 0.30% 胍胶压裂液在  $\phi 73.0$  mm 油管中的摩阻计算式。利用求得的摩阻计算式和经验公式(式(3))计算 Z107 井实际排量下的摩阻,并与实测摩阻进行对比,结果见图 9。

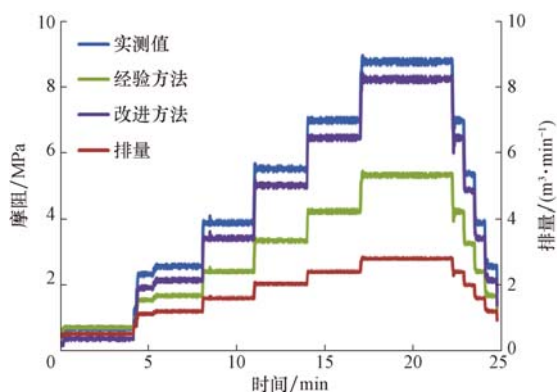


图9 Z107井沿程实测摩阻与计算摩阻的对比

Fig.9 Comparison of measured friction and calculated friction along the wellbore of Well Z107

由图9可知:改进方法计算的摩阻与实测摩阻更接近,平均相对误差不超过16%;而经验公式计算的摩阻与实测摩阻偏差较大,平均相对误差达到了31%。这说明改进方法能够提高胍胶压裂液摩阻的计算精度,可以指导压裂设计和施工。

## 5 结论及建议

1) 提出采用试验和理论相结合的方法来推导不同质量分数胍胶压裂液摩阻的计算方法,与传统经验公式相比,该方法降低了经验公式系数求取的难度,提高了摩阻计算精度。

2) 室内试验和现场实测摩阻结果验证了摩阻计算改进方法的准确性,改进方法计算的摩阻与实

测摩阻的平均相对误差在16%以内,而经验公式的相对误差高达31%。

3) 建议后续开展更多的室内和现场试验,建立不同压裂液在不同直径管柱和排量下的摩阻图版,为压裂设计和施工提供依据。

## 参考文献

### References

- [1] 郭建春,王世彬,伍林.超高温改性瓜胶压裂液性能研究与应用[J].油田化学,2011,28(2):201-205.  
GUO Jianchun, WANG Shibin, WU Lin. Research and application of ultra-high temperature fracture fluids[J]. Oilfield Chemistry, 2011, 28(2): 201-205.
- [2] 杜发勇,张恩仑,张学政,等.压裂施工中管路摩阻计算方法分析与改进意见探讨[J].钻采工艺,2002,25(5):41-43.  
DU Fayong, ZHANG Enlun, ZHANG Xuezheng, et al. The analysis and improvement of friction calculation method in fracturing operation[J]. Drilling & Production Technology, 2002, 25(5): 41-43.
- [3] 张曙辉,刘瑞文,王介玉,等.深水井控中节流管线摩阻分析及压井方法[J].石油钻探技术,2006,34(5):28-29.  
ZHANG Shuhui, LIU Ruiwen, WANG Jieyu, et al. A method of killing well and analysis on choke-line friction losses for deep-water-well control[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(5): 28-29.
- [4] 王鸿勋,张士诚.水力压裂设计数值计算方法[M].北京:石油工业出版社,1998:31-33.  
WANG Hongxun, ZHANG Shicheng. Numerical method of hydraulic fracturing design[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 31-33.
- [5] 孔庆利.考虑流变特性改变的水力压裂管内摩阻计算模型研究[J].科学技术与工程,2013,13(14):3995-3999.  
KONG Qingli. Research on computation model of friction in the oil tube during hydrofracture with consideration of rheology change[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(14): 3995-3999.
- [6] LORD D L. Turbulent flow of stimulation fluids: an evaluation of friction loss scale-up methods[R]. SPE 16889, 1987.
- [7] 刘合,张广明,张劲,等.油井水力压裂摩阻计算和井口压力预测[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊1):2833-2839.  
LIU Ge, ZHANG Guangming, ZHANG Jin, et al. Friction loss calculation and surface pressure prediction in oil well hydraulic fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(supplement1): 2833-2839.
- [8] LORD D L, HULSEY B W, MELTON L L. General turbulent pipe flow scale-up correlation for rheologically complex fluids[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1969, 7(3): 252-258.
- [9] 陈彦东,卢拥军,邱晓慧,等.水基线性压裂液在管路流动中的摩阻分析[C]//第七届全国流变学学术会议,廊坊,8月26-27日,2002年.  
CHEN Yandong, LU Yongjun, QIU Xiaohui, et al. Analysis of frictional resistance of water based linear fracturing fluid in pipeline flow[C]// The 7th National Conference on Rheology, Langfang, August 26-27, 2002.
- [10] 杨超,肖兵.压裂液摩阻影响因素分析[J].石油化工应用,2014,33(5):28-31.  
YANG Chao, XIAO Bing. Fracturing fluid friction factor analysis[J]. Petrochemical Industry Application, 2014, 33(5): 28-31.
- [11] 张景富.钻井流体力学[M].北京:石油工业出版社,1994:179-192.  
ZHANG Jingfu. Drilling fluid mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 179-192.

[编辑 刘文臣]