

存在扶正器条件下三元复合溶液环空流动实验与模型研究

张 权¹ 汪志明^{1*} 翟羽佳¹ 魏建光² 蒋玉梅³

(石油工程教育部重点实验室 中国石油大学(北京)¹,北京 102249;
东北石油大学石油工程系²,大庆 163318;大庆油田第四采油厂³,大庆 163315)

摘要 基于自主研制的全尺寸井筒复杂流动实验模拟装置,考虑存在扶正器条件下的水平井三元复合驱非牛顿流体井筒流动的复杂特性,开展了抽油杆扶正器对三元复合溶液水平环空流动特性影响的实验研究。结果表明,当管路存在扶正器时,流动压降显著增大,且其随流量仍呈近似指数规律增加。运用非牛顿流体力学理论,结合水力当量长度的概念和实测压降数据,建立了存在扶正器条件下的三元复合溶液非牛顿流体水平同心环空流动的压降预测模型。采用 VB.NET 对模型进行了编程求解,其平均绝对百分误差在 10% 以内,性能良好且简单实用。研究成果为后续的存在扶正器条件下的三元复合溶液和原油两相环空流动压降模型的建立及扶正器的优化设计奠定了重要基础。

关键词 三元复合溶液 幂律流体 水平环空 压降 实验 模型

中图法分类号 TE357.46; **文献标志码** A

随着石油勘探开发程度的加深,开采难度逐步增大,提高石油采收率已成为石油工业界普遍关心的问题。三次采油技术是中国近些年来发展起来的一项高新技术,它对提高石油采收率,稳定老油田原油产量有着重要的作用,在我国有着广泛的应用^[1]。化学驱技术是三次采油的核心技术,主要包括聚合物驱、碱驱、表面活性剂驱及其复配的二元和三元复合驱^[2]。“十五”期间大庆油田形成了以烷基苯磺酸盐为主剂的“碱+聚合物+表面活性剂”三元复合驱技术,在我国得到广泛的推广和应用^[3]。

三元复合驱油藏开采时,油井井筒流动通常为三元复合溶液和原油两相环空复杂流动。另外,油井实际生产时,抽油杆和油管之间经常发生偏磨现象,从而导致油管渗漏或抽油杆本体断脱等重大的

经济损失^[4]。虽然采用扶正器能够有效防止杆管偏磨,但扶正器的存在对井筒流场亦有较大的影响,从而增大井筒流动的压耗。因此,需要针对水平井流出动态规律开展实验及理论研究,探索扶正器对流动的影响规律,为扶正器的优化设计提供理论依据。

实践表明,三元复合溶液属于假塑性幂律流体^[5—7]。目前,有关单相幂律流体环空流动压耗研究相对较成熟^[8—10],而有关扶正器的存在对该类流动影响规律的研究并不多见。本文基于自主研制的多功能井筒复杂流动实验模拟装置,对三元复合溶液水平同心环空流动及扶正器的影响规律进行了实验研究。采用局部阻力系数和水力当量长度的概念,结合非牛顿流体力学理论和实验数据,建立了存在扶正器条件下的三元复合溶液水平同心环空流动的压降预测模型。本文的研究成果对后续的三元复合溶液和原油两相环空复杂流动压降模型的构建及油管杆扶正器的优化设计具有重要的指导意义。

2012 年 7 月 16 日收到 中石油大庆油田公司重点科研项目
(DQYT-0504003-2011-JS-682)资助
第一作者简介:张 权(1983—),男,吉林靖宇人,博士,研究方向:
井筒气液多相流体力学。E-mail: zhangquan5258@163.com。

* 通信作者简介:汪志明,E-mail: wangzm@cup.edu.cn。

1 压降模型

基于非牛顿流体力学相关理论,本节首先分析并给出了水平同心环空三元复合溶液流动的压降预测模型。其次,结合管流局部阻力压降当量长度的概念,建立了存在扶正器条件下三元复合溶液管流压降的计算模型。

1.1 无扶正器

如上所述,三元复合溶液实属于幂律型非牛顿流体,该类流体环空流动的压降仍可按 Darcy-Weisbach 公式进行计算^[11]。

$$\Delta p_0 = \lambda \frac{\Delta x}{d_o - d_i} \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

式(1)中, Δp_0 为沿程摩阻压降, Pa; λ 为 Moody 摩阻系数, 无量纲; Δx 为管线长度, m; d_o 、 d_i 分别为环空外管内径和内管外径, m; ρ 为流体密度, kg/m³; v 为管道断面流体的平均速度, m/s。

管流区分层流和紊流两种流动状态, 临界雷诺数可取 2 000 或 2 300。不同流态下的摩擦系数相关式亦有所不同。其中, 幂律流体环空层流时的 Moody 摩擦系数为,

$$\lambda = \frac{96}{Re_{pla}} \quad (2)$$

式(2)中, Re_{pla} 为幂律流体环空流动的广义雷诺数, 按式(3)计算,

$$Re_{pla} = \frac{12^{1-n} \rho (D_o - D_i)^n v^{2-n}}{k \left(\frac{2n+1}{3n} \right)} \quad (3)$$

式(3)中, k 为稠度系数, Pa · sⁿ; n 为流性指数, 无量纲。

幂律流体环空紊流时的 Moody 摩阻系数计算相对较为困难, 故主要考虑两种计算方法: Blasius 型经验公式法和经典的 Dodge-Metzner 半经验公式法。其中, Blasius 型管流摩擦系数公式为^[12],

$$\lambda = \frac{a}{Re_{pla}^b} \quad (4)$$

式(4)中, a 、 b 为由实验确定的经验系数, 皆为流性指数 n 的函数, 其值见表 1。

现对表 1 中的数据进行了数学回归, 结果如图 1 所示, 由此可以得到系数 a 、 b 的经验算式,

$$a = 0.0309 \ln(n) + 0.3109 \quad (5)$$

$$b = -0.06 \ln(n) + 0.2516 \quad (6)$$

表 1 Blasius 经验公式中的系数 a 和 b

n	a	b
0.2	0.2584	0.349
0.3	0.2740	0.325
0.4	0.2848	0.307
0.6	0.2960	0.281
0.8	0.3044	0.263
1.0	0.3116	0.250
1.4	0.3212	0.231
2.0	0.3304	0.213

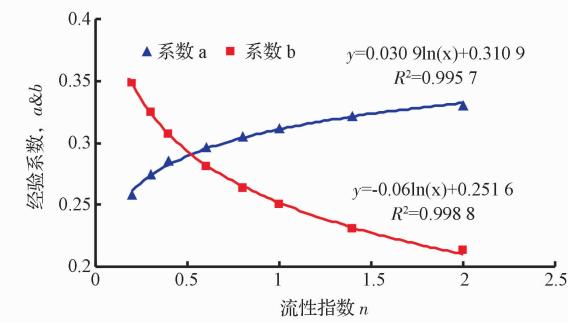


图 1 系数 a 、 b 与流性指数 n 的关系曲线

经典的 Dodge-Metzner 半经验公式为^[13],

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{2.0}{n^{0.75}} \lg [Re_{pla} \lambda^{1-\frac{n}{2}}] - \frac{0.2}{n^{1.2}} \quad (7)$$

研究结果表明^[14], 式(7)具有较高的计算精度, 但该式是关于摩擦系数的隐式方程, 求解相对较为困难。式(4)虽然简单易用, 但该式的精度有待进一步的实验验证。

1.2 有扶正器

现场使用的扶正器的长度与单根抽油杆的长度之比非常小, 且扶正器与生产油管所构成的流动空间的截面积通常很难精确计算, 因此, 将因扶正器引起的附加压降视为局部阻力压降。由经典的流体力学可知, 在液流断面急剧变化及液流方向转变的地方会产生局部阻力, 从而引起附加压降, 现采用下式进行计算,

$$\Delta p_{add} = \lambda \frac{l_e}{d_o - d_i} \frac{\rho v^2}{2} \quad (8)$$

式(8)中, l_e 称为局部阻力压降的水力当量长度, m。

结合式(1)和式(8), 则存在扶正器条件下三元

复合溶液水平环空流动的总压降为,

$$\Delta p = \Delta p_0 + \Delta p_{\text{add}} = \Delta p_0 \left(1 + \frac{l_e}{\Delta x} \right) \quad (9)$$

式(9)是针对一个扶正器的情况,对于多个扶正器的情况,则按式(10)计算,

$$\Delta p = \Delta p_0 + \Delta p_{\text{add}} = \Delta p_0 \left(1 + n \frac{l_e}{\Delta x} \right) \quad (10)$$

理论上计算水力当量长度是非常困难的,通常需要实验方法进行确定。

2 实验设计

2.1 实验装置

实验装置主要由流体供给设备、测试仪器和实验模拟段等三个部分组成,其流程如图2所示。

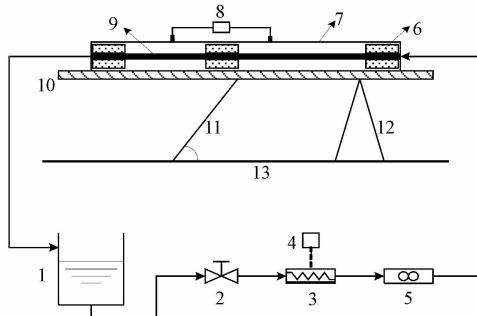


图2 实验流程示意图

1—储液罐,2—节流阀,3—螺杆泵,4—变频柜,5—涡街流量计,
6—尼龙扶正器,7—模拟实验段,8—差压传感器,9—模拟抽油杆,
10—实验台,11—液压升降装置,12—支撑架,13—地面

流体供给设备主要包括储液罐1、螺杆泵3和变频柜4等。其中,变频柜可以用来调节螺杆泵的输出排量,调节范围为0~50 Hz,对应的泵出口排量为0~10 m³/h。实验采用的测试仪器主要包括涡街流量计5和差压传感器8,两者均有4~20 mA的电信号输出,连接计算机后可实现数据的实时采集。

实验模拟段主要包括三部分:模拟油管7、扶正器6、模拟抽油杆9。模拟油管内径为62 mm,壁厚为11 mm,材质为亚克力管。测试段长度为1 m,入口稳流段长度为4 m,出口稳流段长度为2 m。尼龙扶正器的设计尺寸如图3所示,利用定位销分别将3个相同的扶正器固定在入口、测试段中间及出口

处,以保证抽油杆在油管中的同心位置。模拟抽油杆外径为22 mm,材质为不锈钢管。另外,实验台10可以通过液压升降装置8,实现从0°到90°的倾斜,以便进行倾斜流动实验。

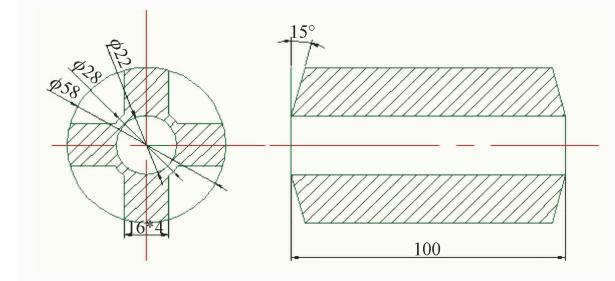


图3 扶正器示意图

实验过程中,首先通过螺杆泵将预先配置好的三元复合溶液泵入模拟实验段,待流动稳定后,即可进行相关实验数据的测定和采集工作。流出实验段的流体直接导入到储液罐中,以便保证整个实验环路流体的正常循环。

2.2 实验条件

本次实验的操作条件如表2所示。

表2 实验条件

参数	取值	单位	
管路倾角	0(水平)	°	
三元 既定 配比	碱 聚合物 表活剂	900 500 100	mg/L
既定流量	40、80、120、160、200	m ³ /d	
环境温度	20~25	℃	
环境压力	0.1	MPa	

2.3 实验步骤

本次实验的主要内容为三元复合溶液环空流动的压降测试实验,其主要步骤为:

- (1)按既定比例配制三元复合溶液,并进行搅拌约30 min;
- (2)取样进行流变参数测量,确定此流体的流变模式及相应的流变参数;
- (3)调整实验管路的倾角至水平状态;
- (4)按既定排量依次将配置好的液体泵入实验环道,待流动稳定后分别进行各次压降的测定实验;
- (5)于测试段中间位置安装抽油杆和扶正器,

并重复(4)操作。

3 结果分析

实验分别对三元复合溶液水平同心环空流动的压降和存在扶正器条件下的相应压降进行了测定,其结果如图 4 所示。

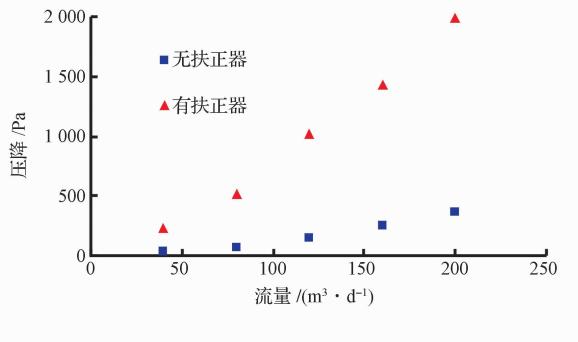


图 4 三元复合溶液水平同心环空流动的实测压降曲线

由图 4 可以看到,存在扶正器时,管路压降有显著的增大,这表明,扶正器的存在对流场和压降都有重要的影响;且存在扶正器时三元复合溶液流动压降仍随流量呈近似指数规律增加。

利用 VB. NET 编程语言,现首先对式(4)和式(7)进行了求解对比,以便选取合适的摩擦系数相关式。计算时,流量按实际的实验工况选取,而三元复合溶液的实测物性参数见表 3。

表 3 实验条件下三元复合溶液相关物性参数的测定值

流体	密度/ $(kg \cdot m^3)$	稠度系数/ $(Pa \cdot s^n)$	流性指数
三元复合溶液	996	0.008 2	0.975 3

需要注意的是,求解式(7)需要用到迭代方法。经对比分析,最终采用 Wolfram 公司研发的 Mathematica 数学软件^[15]提供的动态链接库函数 Wolfram. NETLink. dll 和 VB. NET 相结合的方法,对式(7)进行了求解。式(4)和式(7)的计算结果见表 4。

从表 4 可以看到,Blasius 经验公式的计算结果与经典的 Dodge-Metzner 半经验公式吻合良好,因此,进行幂律流体管流或环空管流的水力计算时,推荐使用简单易用的 Blasius 经验公式法计算紊流

摩擦系数。

表 4 两种摩擦系数相关式的计算结果对比

流量/ $(m^3 \cdot d^{-1})$	流态	Blasius 经验式	Dodge-Metzner 半经验式
40	层流	0.1	0.1
80	层流	0.05	0.05
120	紊流	0.041	0.043
160	紊流	0.038 3	0.039 7
200	紊流	0.036	0.037

然后,用式(9)对存在扶正器条件下的实测压降数据进行了回归运算,得到了存在单个扶正器条件下的三元复合溶液水平同心环空流动的总压降相关式为,

$$\Delta p = \Delta p_0 \left(1 + \frac{5 \cdot 3}{\Delta x} \right) \quad (11)$$

假定扶正器的安装间距大于其有效影响距离,则对于存在多个扶正器情况,流动压降的相关式为,

$$\Delta p = \Delta p_0 \left(1 + n \frac{5 \cdot 3}{\Delta x} \right) \quad (12)$$

式(12)中, n 为扶正器的数量。

最后,利用 VB. NET 编程语言对三元复合溶液水平同心环空流动的压降预测模型即式(1)以及存在扶正器条件下的相应压降预测模型即式(11)进行了求解,计算结果与实测压降的对比分别如图 5 和图 6 所示,可以看到,两个模型的预测值与实测值皆吻合良好。其中,三元复合溶液水平同心环空流动压降预测模型的平均绝对百分误差为 7.2%;存在扶正器条件下三元复合溶液水平同心环空流动的压降预测模型的平均绝对百分误差为 7.6%。误差结果表明,模型的总体性能较好,精度亦符合现场要求。

4 结论及建议

基于自主研制的多功能全尺寸井筒复杂流动实验模拟装置,对三元复合溶液水平同心环空流动规律及扶正器的存在对流动的影响进行了实验研究,采用水力当量长度的概念并结合实验数据,建立了存在扶正器条件下三元复合溶液水平同心环空流动的压降预测模型,具体可以得到以下的几点结论和建议:

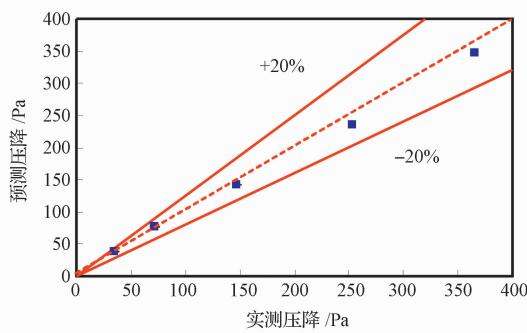


图5 三元复合溶液水平同心环空流动的计算压降和实测压降对比(无扶正器)

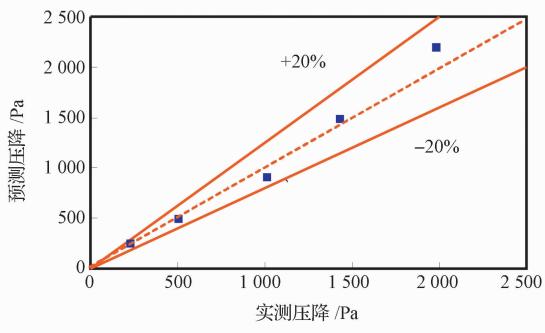


图6 三元复合溶液水平同心环空流动的计算压降和实测压降对比(有扶正器)

(1)利用Mathematica数学软件提供的动态链接库函数Wolfram.NETLink.dll以及VB.NET相结合的方法,可以准确的计算幂律流体管流摩擦系数的Dodge-Metzner公式,这种方法非常适用于编制需要求解类似隐式方程的应用性软件;

(2)根据已有的实验数据回归得到的Blasius型紊流摩擦系数经验相关式的计算结果与经典的Dodge-Metzner半经验公式吻合良好,且利用该经验公式计算得到的三元复合溶液流动的压降与实测压降亦吻合较好,其平均绝对百分误差为7.2%,因此,进行幂律流体管流或环空管流的水力计算时,推荐使用简单易用的Blasius经验公式方法计算紊流摩擦系数;

(3)存在扶正器时,管路压降有显著的增大,这表明,扶正器的存在对流场和压降都有重要的影响;且存在扶正器时三元复合溶液流动压降仍随流量呈近似指数规律增加;

(4)采用水力当量长度的概念,并结合实验压降数据,建立了存在扶正器条件下三元复合溶液水平同心环空流动的压降预测模型,其平均绝对百分误差为7.6%,模型性能较好,符合现场要求;

(5)建议进行更多的室内和现场实验,包括多相流动实验,以便更好的验证本文给出的存在扶正器条件下的压降预测方法和模型的可应用性。

参 考 文 献

- 陈铁龙.三次采油概论.北京:石油工业出版社,2000
- 杨承志.化学驱提高石油采收率.北京:石油工业出版社,2007
- 李梅霞.国内外三次采油现状及发展趋势.当代石油石化,2008;16(12):19—25
- 芦会来,李隽.抽油杆扶正器的应用及分析.油气井测试,2003,12(5):61—63
- Nasr-El-Din H A, Hawkins B F, Green K A. Viscosity behavior of alkaline, surfactant, polyacrylamide solutions used for enhanced oil recovery. Paper SPE21028 presented at the SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Anaheim, California, 20—22 February, 1991
- 陈铁龙,董范,尤冬青,等. ASP三元复合体系宏观流变特征研究.西南石油学院学报,1998;20(1):53—55
- 黄丽,宋俭,周浩,等.碱-表面活性剂-聚合物三元复合驱油体系的流变行为及影响因素.吉林大学自然科学学报,1999;(3):99—101
- Hanks R W, Larsen K M. The flow of power-law non-newtonian fluids in concentric annuli. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1979; 18(1): 33—35
- Uner D, Ozgen C, Tosum I. Flow of a power-law fluid in an eccentric annulus. SPE Drilling Engineering, 1989;4(3): 269—272
- Gupta R K, Chhabra R P. The Flow of Power-Law Non-Newtonian Fluids in Concentric Annuli. AIChE Journal, 1996;42(7): 2080—2083
- 汪志明,崔海清,何光渝.流体力学.北京:石油工业出版社,2006
- 韩洪升,魏兆胜,崔海青,等.石油工程非牛顿流体力学.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006
- Dodge D W, Metzner A B. Turbulent flow of non-newtonian systems. AIChE Journal, 1959;5(2): 189—204
- Singhal N, Shah S N, Jain S. Friction pressure correlations for newtonian and non-newtonian fluids in concentric annuli. Paper SPE94280 presented at the SPE Production Operations Symposium, Oklahoma, 16—19 April, 2005
- 张韵华,王新茂. Mathematica 7实用教程.合肥:中国科学技术大学出版社,2011

Experimental Study and Modeling of ASP Flow in an Annulus with Existence of the Centralizer

ZHANG Quan¹, WANG Zhi-ming^{1*}, ZHAI Yu-jia¹, WEI Jian-guang², JIANG Yu-mei³

(MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing)¹, Beijing 102249, P. R. China;

Department of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University², Daqing 163318, P. R. China;

No. 4 Oil Production Plant of Daqing Oil Field Company Ltd.³, Daqing 163315, P. R. China)

[Abstract] Considering the complex characteristics of non-Newtonian fluid flow in the horizontal wells with existence of the sucker rod centralizer during ASP flooding, a full scale experimental facility was designed and constructed to investigate the effect of sucker rod centralizer on the ASP flow in a horizontal concentric annulus. The result shows that while a centralizer is installed on the inner pipe of the annuli, the pressure drop increases significantly and yet has a exponential relationship with the volumetric flow rate. Based on non-Newtonian fluid mechanics theory, combining the concept of hydraulic equivalent length and the experimental data, a simple and useful model of ASP flow in a horizontal concentric annuli with existence of the centralizer was developed. The model was implemented using VB. NET and the result was compared to the experimental data. It is indicated that the model has a good performance with a mean absolute percentage error of below 10 %. The achievements obtained is an important foundation for the model development of ASP and oil two-phase flow in the horizontal wells, which is a significant criterion of the optimization design for real sucker rod centralizer.

[Key words] ASP solution power-law fluid horizontal annulus pressure drop experiment model

(上接第 8517 页)

An Algorithm for Fast Computation of Large-scale Network Reliability Bounds

YIN Xing, DENG Hong-zhong, LUO Qiang

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology,

Changsha 410073, P. R. China)

[Abstract] Based on the research of network reliability, because the exact computation of two-terminal reliability is NP-complete, an algorithm for the fast computation of large-scale network reliability bounds is proposed. The proposed algorithm is based on mincuts and minpaths to compute upper and lower bounds. At last, an example of regional communication network is presented to compare the exact computation of two-terminal reliability, the result is satisfied. Furthermore, example analysis result shows the efficiency of our algorithm.

[Key words] minpath mincut two-terminal reliability