

# 水平井泡沫携砾石充填数值模拟

周生田<sup>1</sup>, 董长银<sup>2</sup>, 李兆敏<sup>2</sup>, 王海彬<sup>1</sup>, 吴向阳<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学理学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580;  
3. 延长油田股份有限公司杏子川采油厂勘探开发研究所, 陕西延安 717400)

**摘要:**在进行疏松砂岩水平井砾石充填完井过程中,以往均采用牛顿流体作为携砂液。泡沫流体作为非牛顿流体,比牛顿流体具有更好的携带性能,并且具有低滤失性。针对水平井砾石充填作业发生提前堵塞和携砂液进入地层问题,借鉴水平管流的固液两相流动机制,建立水平井泡沫携砾石充填两层数学模型,并且对泡沫在水平井中流动的摩阻系数进行讨论。对偏心率、砾石直径、砾石密度及泡沫干度对砾石充填效果的影响进行计算分析,并以充填效率、砂床高度及综合评价指标表征充填效果。结果表明:随偏心率增大,充填评价指标趋于增加,但增加的幅度较小;随砾石直径、砾石密度及泡沫干度的增加,充填指标趋于降低;泡沫作为携砂液进行砾石充填比牛顿流体具有更好的充填效果。

**关键词:**水平井; 泡沫; 砾石充填; 携砂液; 数值模拟; 固液两相流

**中图分类号:**TE 249 **文献标志码:**A

**引用格式:**周生田,董长银,李兆敏,等. 水平井泡沫携砾石充填数值模拟[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(5):102-106.

ZHOU Shengtian, DONG Changyin, LI Zhaomin, et al. Numerical simulation for foam as sand carrying fluid during gravel packing in horizontal wells[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(5): 102-106.

## Numerical simulation for foam as sand carrying fluid during gravel packing in horizontal wells

ZHOU Shengtian<sup>1</sup>, DONG Changyin<sup>2</sup>, LI Zhaomin<sup>2</sup>, WANG Haibin<sup>1</sup>, WU Xiangyang<sup>3</sup>

(1. College of Science in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

3. Institute of Exploration and Development in Xingzichuan Oil Production Plant, Yanchang Oilfield, Yanan 717400, China)

**Abstract:** Gravel packing has been an important completion method for horizontal wells in unconsolidated sand reservoirs, and Newtonian fluids were normally used as sand carrying fluid. As foam to be a non-Newtonian fluid, it has better carrying capability and low filtration. In the horizontal well gravel packing, early blockage can occur, which can limit the sand carrying fluid into the deep formation. In this study, a two-stage mathematical model for gravel carrying by foam fluids was established based on two-phase flow mechanism for solid-liquid flow in gravel packing process in horizontal wells. The friction factor for foam flow in horizontal wellbore was considered. The influences of well's eccentricity, the size and density of gravels and the foam quality on the performance of gravel packing were investigated. A packing efficiency index, sand bed height index and a comprehensive evaluation index were defined as the evaluation parameters. It is concluded that well's eccentricity has a positive effect on the performance of gravel packing, while the packing efficiency decreases with the increase of the size and density of gravels and foam quality. The gravel packing efficiency and its performance can be significantly improved in horizontal wells using foams as non-Newtonian sand carrying fluid than normal Newtonian fluids.

收稿日期:2014-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51374226);中央高校基本科研业务费专项(10CX04041A)

作者简介:周生田(1965-),男,教授,博士,研究方向为油气田开发、多相流及计算流体力学。E-mail:shengtian@upc.edu.cn。

**Keywords:** horizontal well; foams; gravel packing; sand carrying fluid; numerical simulation; solid-liquid two phase flow

对常规的水平井砾石充填无论是从工艺方面,还是从实验、理论方面都已进行了大量研究<sup>[1-12]</sup>,这些都采用牛顿流体作为携砂液,携带预制好的砾石进入水平井筒中的筛/套环空中,对施工条件要求较高,否则极易发生提前堵塞造成充填失败。在砾石充填过程中,携砂液在携带砾石进行充填过程的同时也比较容易进入地层,从而对地层造成污染。水平井砾石充填实际上是用具有携砂性能的液体携带砾石在水平井井筒中运移的过程。泡沫流体具有比牛顿流体更好的携带性能,而且具有低滤失性<sup>[13-15]</sup>,在水平井钻井、酸化等领域得到了广泛的应用,但对于水平井砾石充填这一重要的完井方式还鲜有研究。笔者借鉴水平管流的两层模型<sup>[16-19]</sup>,用泡沫流体作为携砂液对水平井砾石充填进行数值模拟,以期达到更好的充填效果。

## 1 模型的建立

固液两相在水平环空内的流动可分为静止砂床、移动砂床、非均质悬浮层和纯流体层 4 种不同的流动形态。其中前两种流动形态可根据颗粒沉降在环空底部形成的砂床的状态划分,后两种形态根据颗粒体积分数分布划分,如图 1 所示。

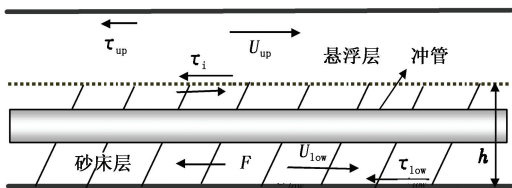


图 1 两层模型受力分析

Fig. 1 Two layers model stress analysis

在图 1 中,最底层代表颗粒砂床,在这一层假设砾石体积分数为 52%,上层包含悬浮的颗粒和携砂液。其他的一些假设:不考虑每一层中的固相和液相之间的滑移;固、液相之间不存在质量交换;固、液系统不可压缩而且和单相流体的流变参数相同;每层之间的表面力效应忽略不计;整个环空段砂床高度保持不变。

基于以上假设,建立固相和液相的质量守恒方程和上下两层的动量守恒方程。

固相质量守恒方程为

$$U_{up} C_{up} A_{up} + U_{low} C_{low} A_{low} = U_{mix} C_{mix} A_{an}; \quad (1)$$

液相质量守恒方程为

$$U_{up}(1-C_{up})A_{up} + U_{low}(1-C_{low})A_{low} = U_{mix}(1-C_{mix})A_{an}. \quad (2)$$

上层动量守恒方程为

$$A_{up} \frac{dp}{dx} = -\tau_{up} S_{up} - \tau_i S_i; \quad (3)$$

底层动量守恒方程为

$$A_{low} \frac{dp}{dx} = -F - \tau_{low} S_{low} + \tau_i S_i. \quad (4)$$

式中, $U_{up}$ 、 $U_{low}$ 和 $U_{mix}$ 分别为上层、底层和混合流速, $m/s$ ;  $C_{up}$ 、 $C_{low}$ 和 $C_{mix}$ 分别为上层、底层和混合体积分数; $A_{up}$ 、 $A_{low}$ 和 $A_{an}$ 分别为上层过流截面、底层过流截面和井筒/筛管环空截面面积, $m^2$ ;  $S_{up}$ 、 $S_{low}$ 和 $S_i$ 分别为上层、底层和界面湿周, $m$ ;  $\tau_{up}$ 、 $\tau_{low}$ 和 $\tau_i$ 分别为上层、底层和界面剪切应力, $Pa$ ;  $\frac{dp}{dx}$ 为压力梯度; $F$ 为静力。

## 2 模型求解

(1) 摩阻系数。对于泡沫流体,层流摩阻系数为

$$f = \frac{2v^{n-2}k}{D^n \rho} \left( \frac{2+6n}{n} \right)^n = \frac{16}{D^n v^{2-n} \rho} \frac{1}{8} \left( \frac{2+6n}{n} \right)^n. \quad (5)$$

式中, $v$ 为流体流速, $m/s$ ;  $\rho$ 为泡沫流体密度, $kg \cdot m^{-3}$ ;  $D$ 为颗粒直径, $m$ ;  $k$ 为幂律系数; $n$ 为幂律指数。

为简化计算,Dodge 和 Metzner 根据实验数据,由 $f-Re_{MR}$ 关系曲线总结出幂律流体紊流摩阻系数的 Blasius 型经验式,简记为 D&MB 公式<sup>[16]</sup>:

$$f = \frac{a}{Re_{MR}^b}. \quad (6)$$

其中

$$a = 0.0665 + 0.01175n',$$

$$b = 0.365 - 0.1775n' + 0.0625n'^2.$$

式中, $n'$ 为流动特性指数。

从层流向紊流过渡的临界雷诺数由 Ryan 和 Johnson 导出的幂律流体临界雷诺数的计算,关系式为

$$Re_{MRc} = \frac{6464n}{(1+3n)^2 \left( \frac{1}{2+n} \right)^{(2+n)/(1+n)}}. \quad (7)$$

Hanks & Ricks 临界雷诺数的计算式为

$$Re_{MRc} = 2975 - 875n. \quad (8)$$

(2) 界面剪切力的确定。采用式(8)判断层流

向紊流的临界雷诺数。层与层之间的界面剪切力为

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_{\text{mix\_up}} (U_{\text{up}} - U_{\text{low}})^2. \quad (9)$$

根据 Televantors, 摩擦因子计算式为

$$\frac{1}{\sqrt{2f_i}} = -0.88 \ln \left[ \frac{\frac{D_p}{D_{h\_up}} + 2.51}{3.7 Re_{up} \sqrt{2f_i}} \right]. \quad (10)$$

(3) 静力  $F$  的确定。式(4)中的静力  $F$  由砂床中的颗粒和井筒接触产生, 它的最大值与移动砂床产生的力成正比, 根据 Bagnold, 最大力  $F_{\text{max}}$  为

$$F_{\text{max}} = \eta \left[ (\rho_p - \rho_f) g C_{\text{low}} \sin \theta A_{\text{low}} + \frac{\tau_i S_i}{\tan \phi} \right]. \quad (11)$$

式中,  $\rho_p$  和  $\rho_f$  分别为砾石和流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\phi$  为内摩擦角。

(4) 上层颗粒体积分数的确定。由扩散方程可以得到砂床上层颗粒体积分数分布为

$$C_{\text{up}}(y) = C_{\text{low}} \exp \left[ -\frac{v_s}{\varepsilon} (y-h) \sin \theta \right]. \quad (12)$$

式中,  $v_s$  为颗粒沉降速度;  $\varepsilon$  为扩散因子;  $\theta$  为水平井倾斜角。本文中研究的是水平井砾石充填,  $\theta = 90^\circ$ ,

则式(12)变为  $C_{\text{up}}(y) = C_{\text{low}} \exp \left[ -\frac{v_s}{\varepsilon} (y-h) \right]$ 。

根据两层质量和动量守恒方程, 结合相关参数的表达式, 对上述方程组进行数值求解, 并开发了水平井泡沫携砾石充填数值模拟软件, 对影响水平井砾石充填效率的施工参数进行敏感性分析。

## 3 计算结果分析

计算中所用水平井砾石充填的基础参数: 油藏压力为 29 MPa, 水平段长 300 m, 完井方式为裸眼砾石充填, 筛管外径和内径分别为 96 和 65 mm, 砾石尺寸为 0.2 ~ 0.8 mm, 砾石密度为 2 000 ~ 5 000  $\text{kg/m}^3$ , 泡沫干度为 0.55 ~ 0.75, 幂律指数为 0.6 ~ 1.0。

### 3.1 水平井砾石充填的综合评价指标

研究发现, 所形成的砂床高度太高或太低都意味着较差的充填效果, 因此可认为当砂床高度等于井筒半径时的充填最稳定, 效果最好。为使用方便, 将最终砂床高度按如下的方法进行无因次化, 得到最终砂床高度评价指标:

$$\Psi_h = 1 - \frac{|R-h|}{R}.$$

式中,  $h$  为最终砂床高度, mm;  $R$  为井筒半径, mm;  $\Psi_h$  为最终砂床高度评价指标。

砂床高度评价指标  $\Psi_h$  越大, 充填效果越好。

充填效率本身为一无因次量, 可直接作为充填效率的评价指标。为了能更好地使用评价指标优化施工参数组合, 须将砂床高度评价指标和充填效率指标表述成一个综合评价指标。用  $\alpha_\eta$  和  $\alpha_h$  分别表示充填效率和砂床高度评价指标的权重系数, 则综合评价指标为

$$V = \alpha_\eta \eta + \alpha_h \Psi_h, \quad \alpha_\eta + \alpha_h = 1.$$

式中,  $\eta$  为充填效率评价指标, 定义  $\eta = \frac{A_{\text{low}}}{A_{\text{an}}}$ ;  $\alpha_\eta$ 、 $\alpha_h$  分别为充填效率评价指标和砂床高度评价指标的权重系数, 可取 0.75 和 0.25;  $V$  为水平井砾石充填综合评价指标。

### 3.2 敏感性分析

#### 3.2.1 偏心率对充填效果的影响

偏心率对评价指标的影响如图 2 所示。从图 2 中可以看出各评价指标随着偏心率的增大而增大, 但变化的幅度很小。为了提高充填的成功率, 应尽可能地增大偏心率, 但偏心率也不能太大, 若偏心率接近于 1, 则在冲管的周围存在过厚的和过薄的砾石充填层, 过薄的砾石层不能有效阻止地层砂进入井筒, 达不到水平井砾石充填的目的。

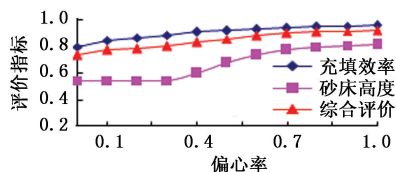


图 2 偏心率对充填效果的影响

Fig. 2 Influence of eccentricity on packing effect

#### 3.2.2 砾石直径对充填效果的影响

砾石直径对评价指标的影响如图 3 所示。各评价指标随砾石直径的增加而逐渐降低。当砾石直径在 0.2 ~ 0.4 mm 时, 对 3 个评价指标影响不明显, 砾石直径超过 0.4 mm 时, 3 个评价指标明显降低, 这是由于砾石直径越大, 越不容易被流体携带, 越易形成提前堵塞, 可能导致充填失败。

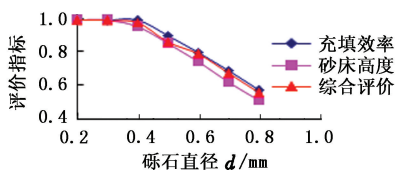


图 3 砾石直径对充填效果的影响

Fig. 3 Influence of gravel diameter on packing effect

#### 3.2.3 砾石密度对充填效果的影响

砾石密度对评价指标的影响如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 各评价指标随砾石密度的增加急剧

降低,砾石密度一旦超过  $2000\text{ kg/m}^3$ ,3 个评价指标都下降很快,这是由于砾石密度越大,越不容易被流体携带,在未到达目的段前沉积,形成提前堵塞,不利于砾石充填,可能导致充填失败。所以在砾石充填时,为了达到理想的充填效果,需要对砾石密度进行优选。

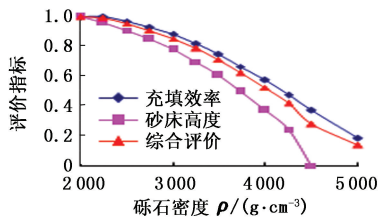


图 4 砾石密度对充填效果的影响

Fig. 4 Influence of gravel density on packing effect

3.2.4 泡沫干度对充填效果的影响

泡沫干度对充填效果的影响如图 5 所示。图 5 表明各评价指标随着泡沫干度的增大而减小。在计算模拟的范围内,当泡沫干度为 0.55 时,3 个评价指标达到最大值,随泡沫干度的增大,特别是在 0.7~0.75,评价指标明显降低。这是由于泡沫干度增大,泡沫流体的黏度增大,其携带砾石的能力增强,砾石不容易沉积形成充填砂床层,导致大部分砾石被泡沫流体携带至水平井趾端,不能形成有效充填。

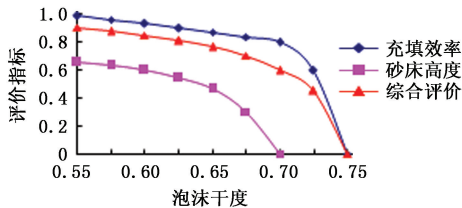


图 5 泡沫干度对充填效果的影响

Fig. 5 Influence of foam quality on packing effect

3.2.5 泡沫流体与牛顿流体作为携砂液对水平井砾石充填效果对比

幂律指数(携砂流体性质)对充填效果的影响如图 6 所示。由图 6 可以看出,随着砂浆排量的增大,3 个充填指标逐渐增大,到达某一临界值后趋于平缓;超过某一值后,根据泡沫流体指数的不同,其结果有所不同,其中  $n$  的取值越接近于 1,其流动特性越接近牛顿流体,充填结果与常规牛顿流体作为携砂液的充填效果类似。泡沫流体的幂律指数越小越具有较高的充填效率。在较高的砂浆排量下泡沫流体比牛顿流体具有更高的充填效率,这说明泡沫流体具有较强的携带能力和较低的滤失性,显示了比牛顿流体作为携砂液的优越性。

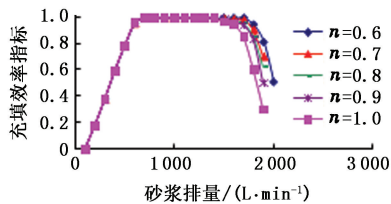


图 6 幂律指数对充填效果的影响

Fig. 6 Influence of power law exponent on packing efficiency

4 结 论

(1)借助于固液两相流中的两层模型,建立了水平井泡沫携砾石充填数学模型,对泡沫携砾石充填中泡沫流体在水平井筒中的流动阻力进行了分析。

(2)计算条件下,随偏心距的增大,充填评价指标趋于增加,但增加的幅度较小;充填评价指标随砾石直径、砾石密度及泡沫干度的增加而降低。

(3)泡沫流体作为携砂液进行水平井砾石充填比牛顿流体作为携砂液具有更好的充填效果。

参考文献:

[1] GRUESBECK C, SALATHIEL W M, ECHOLS E E. Design of gravel packs in deviated wellbores [R]. SPE 6805, 1979.

[2] FORREST J K. Horizontal gravel packing studies in a full-scale model wellbore [R]. SPE 20681, 1990.

[3] PENBERTHY W L, BICKHAM K L, NGUYEN H T, et al. Gravel placement in horizontal wells [R]. SPE 31147, 1995.

[4] 胥锐一,魏斌,韩德民,等. 水平井砾石充填防砂模拟研究[J]. 油气采收技术, 1998, 5(2): 64-69.

XU Ruiyi, WEI Bin, HAN Demin, et al. Simulation study on gravel packing sand control for horizontal wells [J]. Oil and Gas Recovery Technology, 1998, 5(2): 64-69.

[5] MARK A. Mechanics of gravel packing: a design and evaluation approach [J]. SPE Production Engineering, 1988, 3(1): 69-82.

[6] 董长银,张琪. 水平井砾石充填过程实时数值模拟研究[J]. 石油学报, 2004, 25(6): 96-100.

DONG Changyin, ZHANG Qi. Real time simulation of gravel packing process in horizontal wells [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(6): 96-100.

[7] 李爱芬,杨柳. 水平井砾石充填数值模拟研究[J]. 石油学报, 2002, 23(1): 102-106.

LI Aifen, YANG Liu. Numerical simulation study of

- gravel packing in horizontal well[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 23(1): 102-106.
- [8] 周生田, 李兆敏, 董长银. 水平井砾石充填数值模拟研究进展[J]. *力学与实践*, 2009, 31(3): 9-15.
- ZHOU Shengtian, LI Zhaomin, DONG Changyin. Progress of research on numerical simulation of gravel packing in horizontal wells [J]. *Mechanics and Practice*, 2009, 31(3): 9-15.
- [9] 赵焯. 水平井砾石充填防砂技术研究及应用[D]. 青岛: 中国石油大学石油工程学院, 2007.
- ZHAO Xuan. Research and application of horizontal gravel packing sand control technology[D]. Qingdao: School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, 2007.
- [10] 李明忠, 李彦超, 王卫阳, 等. 考虑井筒变质量流动的砾石充填水平井产能预测[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(3): 89-93.
- LI Mingzhong, LI Yanchao, WANG Weiyang, et al. Productivity prediction for gravel-packed horizontal well considering variable mass flow in wellbore[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2011, 35(3): 89-93.
- [11] 董长银, 贾碧霞, 张迎春, 等. 大斜度井砾石充填机理[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(5): 72-76.
- DONG Changyin, JIA Bixia, ZHANG Yingchun, et al. Mechanism of gravel-packing in highly deviated wells [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2008, 32(5): 72-76.
- [12] 董长银, 武龙, 王爱萍, 等. 水平井及大斜度井砾石充填过程试验[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(2): 74-77.
- DONG Changyin, WU Long, WANG Aiping, et al. Experimental simulation of gravel-packing in horizontal and highly deviated wells[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2010, 34(2): 74-77.
- [13] IYOH A W, AZAR J J. An accurate slot-flow model for non-Newtonian fluid flow through eccentric annuli [J]. *SPEJ*, 1981, 21(5): 565-572.
- [14] REIDENBACH V G, HARRIS P C, LEE Y N. Rheological study of foam fracturing fluid using nitrogen and carbon dioxide[J]. *SPEPE*, 1986, 1(1): 31-41.
- [15] MARTINS A L. Foam property requirement for proper hole cleaning while drilling horizontal wells in underbalanced conditions[R]. SPE 64382, 2000.
- [16] 高鹏, 张劲军. 幂律流体内紊流摩阻系数计算式评价[J]. *油气储运*, 2005, 24(9): 13-19.
- GAO Peng, ZHANG Jinjun. Evaluation of the formulas for calculating the power law fluids in turbulent pipe flow friction coefficient[J]. *Oil and Gas Storage and Transportation*, 2005, 24(9): 13-19.
- [17] 王海彬. 水平井泡沫携砾石充填数值模拟研究[D]. 青岛: 中国石油大学理学院, 2010.
- WANG Haibin. Numerical study on foam carrying gravel pack in horizontal wells[D]. Qingdao: College of Science in China University of Petroleum, 2010.
- [18] 李兆敏, 李冉, 刘伟, 等. 泡沫在油气田开发中的应用及展望-泡沫流体在近井及地层中的应用[J]. *油田化学*, 2013, 30(1): 155-160.
- LI Zhaomin, LI Ran, LIU Wei, et al. The application and prospect for foam in oil and gas field development-the application for foam fluid in the near wellbore and formation[J]. *Oilfield Chemistry*, 2013, 30(1): 155-160.
- [19] 王海彬, 周生田. 水平井砾石充填研究进展及展望[J]. *内蒙古石油化工*, 2010(10): 14-19.
- WANG Haibin, ZHOU Shengtian. Progress and prospect of research on horizontal well gravel packing[J]. *Inner Mongolia Petrochemical*, 2010(10): 14-19.

(编辑 李志芬)