

影响水平井注水泥顶替效率主要因素的 数模分析研究

谭元铭^{1,2}, 徐璧华^{1,2}, 朱亮^{1,2}

(1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500; 2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 西南石油大学, 四川 成都 610500)

摘要:水平井注水泥过程中,顶替效率的高低受多种因素的影响。其中,套管偏心度、冲洗液流变性能以及冲洗液与钻井液的密度差的影响较为突出。为了解水平井固井注水泥过程中各种影响因素的作用规律,借助流体力学软件 Fluent,建立了偏心水平井三维模型,采用流体体积法(vof)进行了冲洗液顶替钻井液的数值模拟研究。模拟井筒直径为 215.9 mm(8½ in),模拟套管外径为 177.8 mm(7 in),环空长度为 300 m,冲洗液顶替速度为 1 m/s,套管偏心度根据具体算例选取 0、0.2、0.3、0.4。模拟结果表明:顶替效率随套管偏心度增加而降低,适当提高水泥浆流性指数,降低稠度系数有利于提高顶替界面的稳定,缩短界面长度,提高顶替效率。当冲洗液与钻井液之间形成正密度差关系时有利于顶替效率的提高。

关键词:水平井固井;顶替效率;fluent 软件;偏心度;冲洗液流变性能;密度差

中图分类号:TE256+.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2015)04-0006-07

Analysis and Research on Numerical Simulation of the Main Factors Affecting Cementing Displacement Efficiency at Horizontal Wells/TAN Yuan-ming^{1,2}, XU Bi-hua^{1,2}, ZHU Liang^{1,2} (1. Institute of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China; 2. The State Key Lab of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China)

Abstract: There are many factors which affect the displacement efficiency in the cementing process at horizontal wells. In these factors, the eccentricity of casing, rheological property of flushing fluid and density difference between flushing fluid and drilling fluid are prominent. In order to understand the influence of various factors on horizontal cementing, three-dimensional model of eccentric horizontal well was established by CFD software and numerical simulation study was made on drilling fluid being displaced by flushing fluid by means of VOF method. The inner and outer diameters of the simulated wellbore and casing are 177.8mm(7in) and 215.9mm(8½in) respectively, the length of annulus is 300m, the displacement velocity is 1m/s and the casing eccentricity is selected 0, 0.2, 0.3 and 0.4 separately according to the specific example. The simulated results indicate that the eccentricity of casing at horizontal wells is unfavorable to cementing displacement efficiency, and increasing flow behavior index and decreasing consistency index are helpful for improving the stability of displacement interface, reducing its length and enhancing displacement efficiency as well. Meanwhile, when the positive density difference between flushing fluid and drilling fluid is formed, it is conducive to the improvement of displacement efficiency.

Key words: horizontal cementing; displacement efficiency; Fluent software; eccentricity; rheological property of flushing fluid; density difference

0 引言

固井质量是保证油气井寿命、提高采收率以及合理开发油气资源的关键环节^[1]。顶替效率是影响固井施工和质量的重要因素,受井径、套管偏心度、井壁泥饼、顶替效率等影响^[2]。

本文尝试应用流体力学计算机数值模拟软件 fluent,模拟分析了水平井注水泥过程中套管偏心度、冲洗液流变性能以及冲洗液与钻井液密度差等对顶替效率的影响,对提高水平井固井质量具有重要的现实意义。

收稿日期:2014-12-08

作者简介:谭元铭,男,汉族,1990年生,硕士研究生在读,主要从事固井技术方面的研究工作,四川省成都市新都区新都大道8号, TYM163youxiang@163.com。

1 顶替仿真实验模型

1.1 物理模型^[3-4]

模拟采用三维空间模型,计算区域为长300 m、外径215.9 mm(8½ in)、内径177.8 mm(7 in)的环空流道,偏心度根据具体算例选择0、0.2、0.3、0.4四种情况,网格采用六面体结构化网格。

计算区域内模拟冲洗液顶替钻井液的过程,冲洗液为顶替液,不同算例下的冲洗液流变参数取值不同。钻井液为被顶替液,密度1.35 g/cm³、流性指数0.540、稠度系数为1.08 Pa·sⁿ。

1.2 数值模拟数学模型

在水平井固井顶替过程中,水泥浆、隔离液、冲洗液、钻井液均为两两顶替,存在多个顶替界面,但都属于长距离环空间隙中的液-液两相流过程,因此满足流体力学基本方程^[5-6]。

1.2.1 流体力学基本方程

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla V = 0 \quad (1)$$

(2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla(\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T)] + \rho g \quad (2)$$

式中: p ——静压强,Pa; μ ——动力粘度,Pa·s; v ——流速,m/s; g ——重力加速度,m/s²; ρ ——容积比率平均密度,kg/L。

对于两相流而言,密度的值由公式(3)计算得出。

$$\rho = \alpha_m \rho_m + \alpha_c \rho_c \quad (3)$$

式中: ρ_m 、 ρ_c ——钻井液和冲洗液的密度,g/cm³; α_m ——钻井液的体积分数; α_c ——冲洗液的体积分数。

(3) 标准 $k-\varepsilon$ 湍流粘度模型方程

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{c_1 \varepsilon}{k} \cdot \mu \cdot \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \right) \quad (5)$$

(4) 物质运输模型

第*i*种物质的对流扩散方程用于计算*i*种物质

的质量分数 Y_i ,用于捕捉两相界面,以及两相界面附近的质量扩散。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla J_i + R_i + S_i \quad (6)$$

1.2.2 边界条件

入口采用速度入口边界条件,速度为1 m/s,出口为压力出口边界条件,表压为0;壁面按无滑移边界条件处理;时间步长取0.01 s。

1.3 模型求解

利用Fluent软件进行模拟计算时,空间上采用结构化的六面体网格,数值方法采用双精度有限体积方法。离散时,时间上采用隐格式,对流项用一阶迎风有限元离散格式,压力速度场的耦合求解采用改良后的压力速度校正(SIMPLEC)方法。

2 计算结果分析

在数值模拟图(图1、图2、图3、图5、图8)中的红色流体表示冲洗液、蓝色流体表示钻井液,右侧坐标中的数值表表示各处冲洗液的容积比率 α , $\alpha=1$ 表示全为冲洗液, $\alpha=0$ 表示全为钻井液。

2.1 套管偏心对顶替效率的影响

套管偏心程度可以用偏心度^[7]来表示,偏心度 e 定义为: $e = \varepsilon / (R - r)$ (其中: R 和 r 分别为井眼半径和套管外半径,cm; ε 为偏心距,cm)。

由于存在偏心的影响,液体的流速、流量及流态在不同间隙将发生变化,从而影响顶替效率^[8]。在不同偏心度下,三维模拟对比情况、顶替纵剖面对比情况、同一距离(5 m)的横截面对比情况以及横截面顶替效率对比分别如图1~4所示。

由图1~4可看出:在无偏心即套管居中条件下,冲洗液可以以紊流流态较好地冲洗环空间隙,顶替效率较高,能够达到比较理想的冲洗效果;随着偏心度的增加,冲洗液主要在宽间隙流动而在窄间隙中流动缓慢,在偏心度较大时还会出现泥浆滞留的现象,这必然会影响后期的水泥浆顶替效果及第一界面、第二界面胶结质量,造成固井质量不良。

2.2 冲洗液流变性能对顶替效率的影响

2.2.1 流性指数 n 对顶替效率的影响

流性指数代表液体在一定速度梯度下的非牛顿性,反映了液体流速曲线的平缓程度和剪切稀释性能。 $n=1$ 表明冲洗液为牛顿流体。 n 为0~1时表明冲洗液为假塑性流体, n 越小,流体的非牛顿性

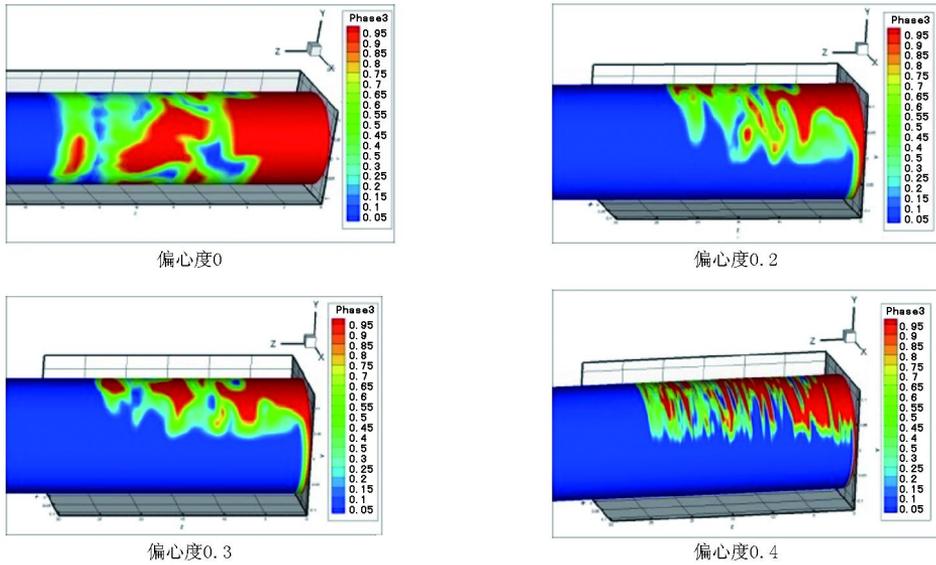


图1 偏心率0、0.2、0.3、0.4的三维模拟图

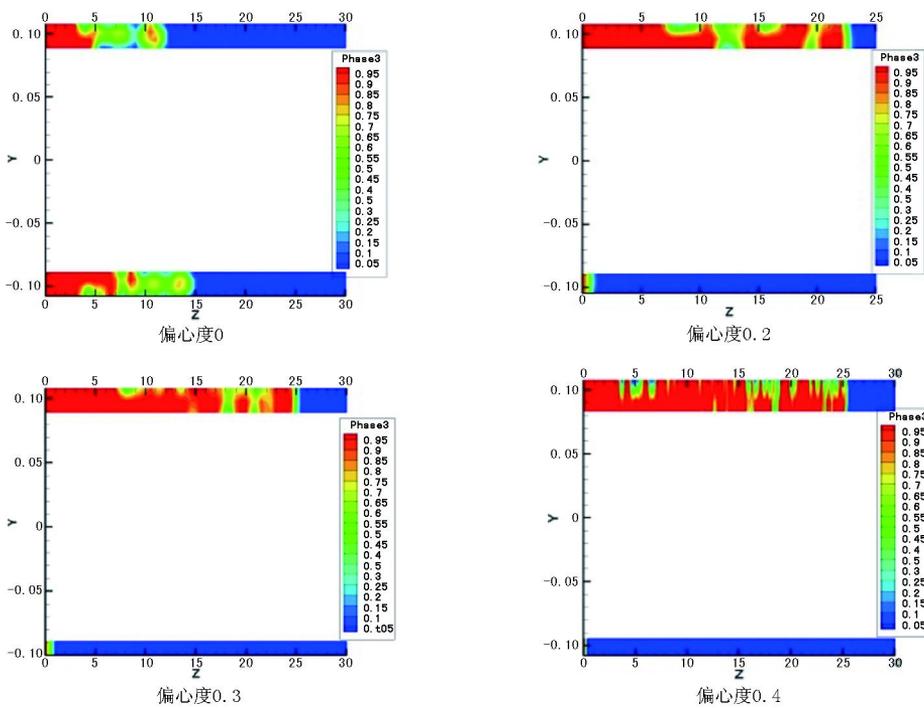


图2 偏心率0、0.2、0.3、0.4的顶替纵剖面图

越强,流速曲线分布越平缓,剪切稀释性能也越强。

顶替界面、界面长度和顶替效率随流性指数 n 增加的变化情况如图5~7所示。

从图5~7可看出:冲洗液的流性指数对顶替效率有较大的影响;当冲洗液的流变性和钻井液完全一样时,宽间隙中的冲洗液流动速度要明显快于窄间隙,锥进现象较为明显,顶替效率较好;当冲洗液的流性指数低于钻井液的流性指数时,顶替混合界

面长度相对较短但是尾迹伴有断裂,窄间隙流动缓慢,横截面顶替效率 $\geq 50\%$;当冲洗液的流性指数增加,窄间隙的流动性明显增强,宽间隙的顶替界面锥进现象明显减弱,横截面上的顶替效率明显提高。出现这种现象的原因是随着流性指数增加,冲洗液在窄间隙的流动能力变好,宽窄间隙的顶替界面距离缩短,从而挺高了整体的顶替效率。

2.2.2 稠度系数 k 对顶替效率的影响

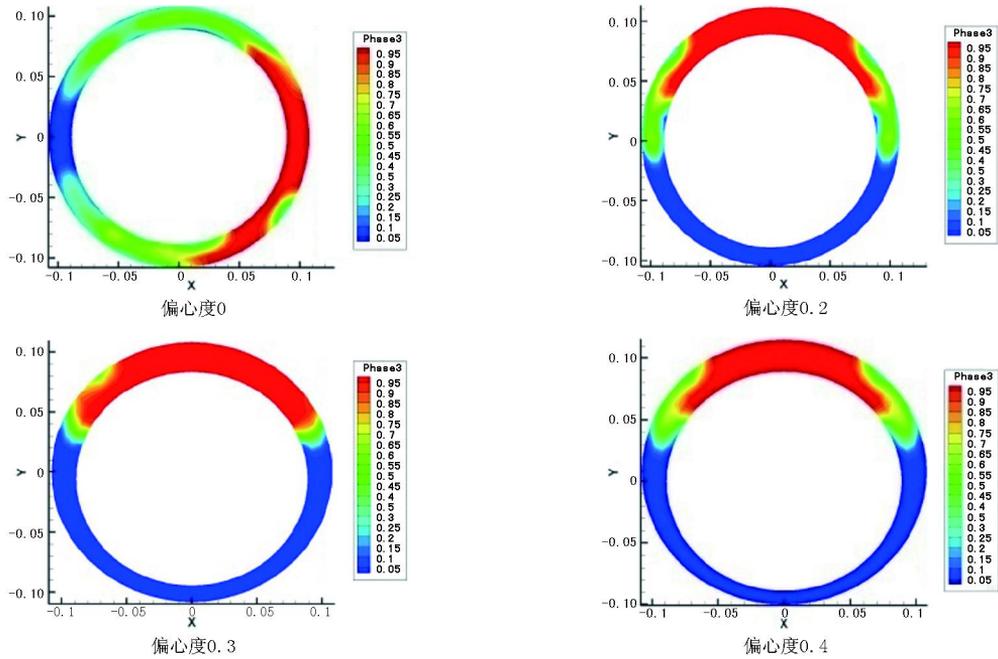


图 3 偏心率 0、0.2、0.3、0.4 在同一距离(5 m)的横截面对比图

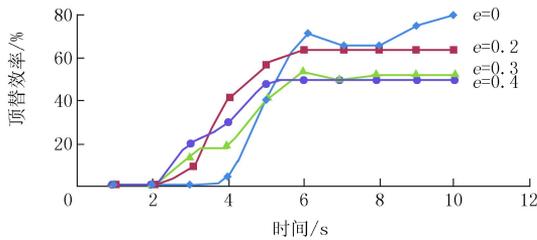


图 4 偏心率对横截面顶替效率的影响

稠度系数代表着液体的内摩擦力,与液体的粘度有关。稠度系数越大,流体流动越困难。

当稠度系数 k 值增加时,宽间隙中冲洗液的顶替界面锥进现象较为严重,冲洗液与钻井液的混合界面(图中绿色部分)较长且存在不稳定现象,窄间隙中冲洗液的顶替界面相对稳定,但是相同时刻宽窄间隙的混合界面长度距离较短(如图 8 所示)。

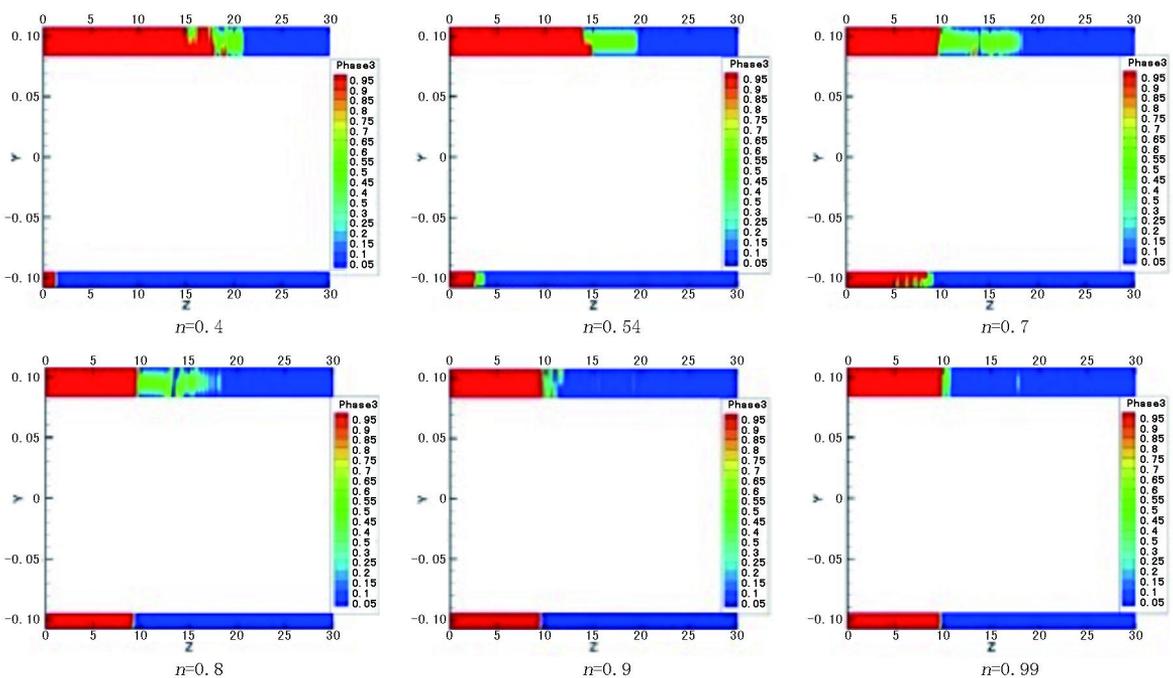


图 5 不同流性指数的冲洗液纵剖面顶替效果图

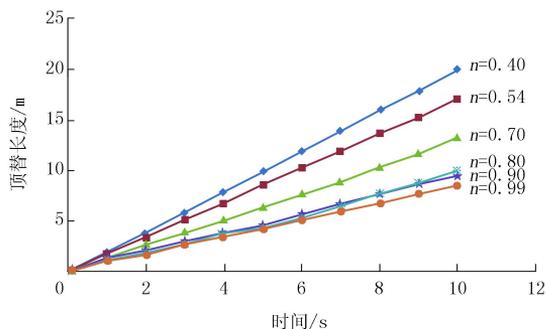


图6 不同流性指数的冲洗液的顶替界面长度曲线

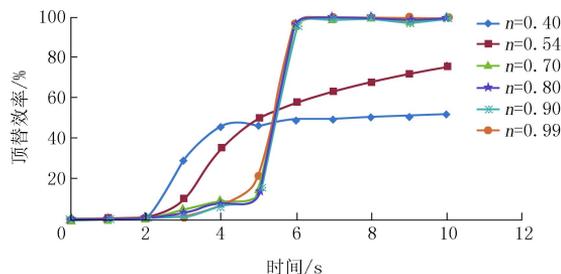


图7 不同流性指数的冲洗液的横截面顶替效率曲线

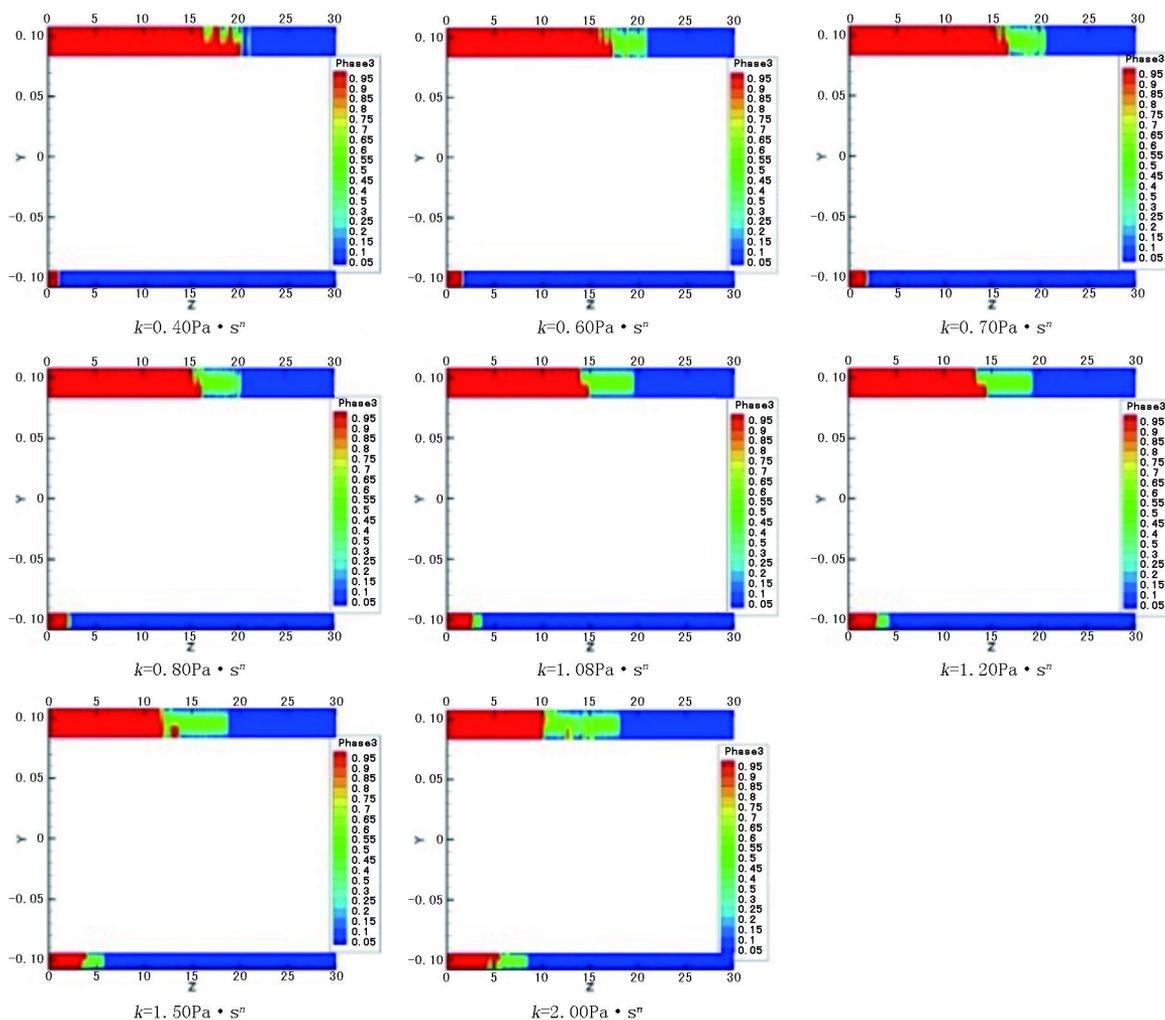


图8 不同稠度系数的冲洗液纵剖面顶替效果图

从横截面的顶替效率来看,稠度系数 k 值增加,顶替效率有所提高,主要原因是 k 值增大,冲洗液在宽间隙中流动减缓,宽窄间隙顶替界面长度距离变短(如图9、图10所示)。因此,适当提高冲洗液的稠度系数将有利于冲洗液顶替钻井液时的顶替效率,有助于后期水泥浆顶替。

2.3 密度差对顶替效率的影响

水平井固井过程中顶替液与被顶替液之间的密度差是影响顶替效率的一个重要因素^[9-10]。

在采用负密度差顶替时,顶替界面的长度要比正密度差时要长,并且负密度差越大,顶替界面长度越长;随着正密度差的增大,顶替界面也越长(如图

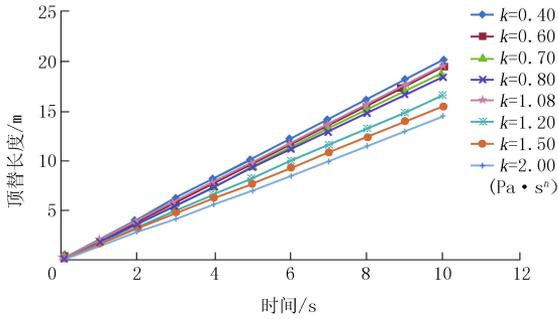


图 9 不同稠度系数冲洗液的顶替界面长度曲线

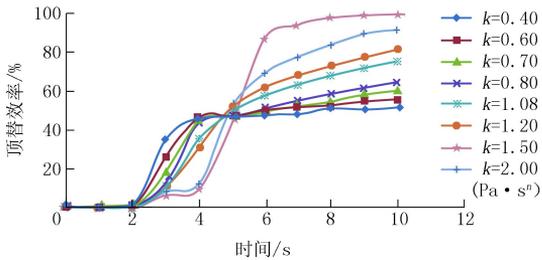


图 10 不同稠度系数冲洗液在同一横截面(5 m)的顶替效率曲线

11 所示)。从同一横截面顶替效率上看,正密度差顶替时,冲洗液的顶替效率也要高于负密度差时(如图 12 所示)。当密度差为 0.2 g/cm^3 时,冲洗液的顶替效率要明显高于其他 4 组密度差对应的顶替效率。负密度差顶替时,顶替效率极低,顶替效率只有 50% 左右。

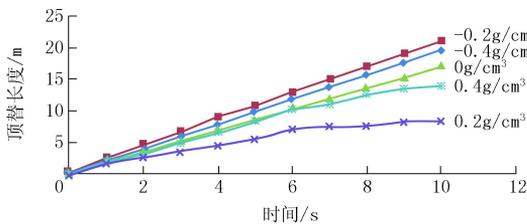


图 11 不同密度差条件下顶替界面长度曲线

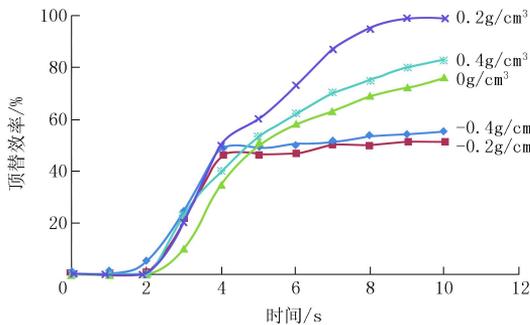


图 12 不同密度差条件下横截面顶替效率曲线

在采用正密度差顶替时,之所以顶替界面长度要短于负密度差顶替时的顶替界面长度,主要原因

就是冲洗液密度相较于钻井液密度高,在顶替过程中受到重力作用使宽边高密度冲洗液在顶替界面附近向下方低速的窄边流动,提高了窄边的流量,克服了偏心度的影响,提高了水平井窄边的顶替效率。重力作用超过宽窄边效应的影响时,形成一个高密度顶替流体在下方的分层的顶替界面,顶替界面长度随顶替时间增加而增长,但增长的越来越缓慢,有利于提高水平井顶替效率^[11]。负密度差顶替时,重力作用弱于宽窄边效应,宽间隙流动将明显优于窄间隙,冲洗液密度越小,钻井液对冲洗液的浮力效果越好,导致宽间隙液面流动距离与窄间隙液面流动距离增加,从而导致顶替效率降低。

3 模拟结果同实验结果对比

利用相似液进行水平井顶替模拟实验,并用 PIV 系统拍摄高速图像得到如图 13、图 14 所示的宽窄间隙轴向速度分布图。

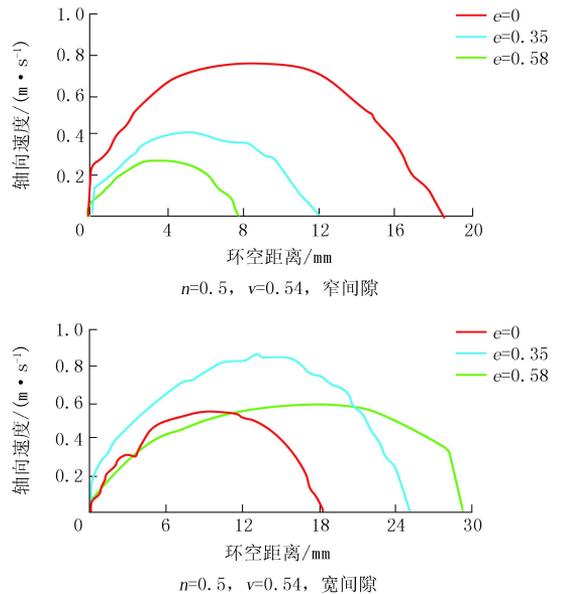


图 13 不同偏心度宽窄间隙轴向速度分布曲线

对比实验和数值模拟结果发现:无论宽窄间隙,随着偏心度的增加,顶替液锥进现象明显;随着流性指数的挺高,窄间隙中顶替液流动速率明显挺高,有利于窄间隙的顶替。因此,数值模拟顶替过程能够正确反应真实的顶替过程。

4 结论

(1) 水平井顶替过程中,应该尽量使套管居中,有利于提高固井顶替效率;

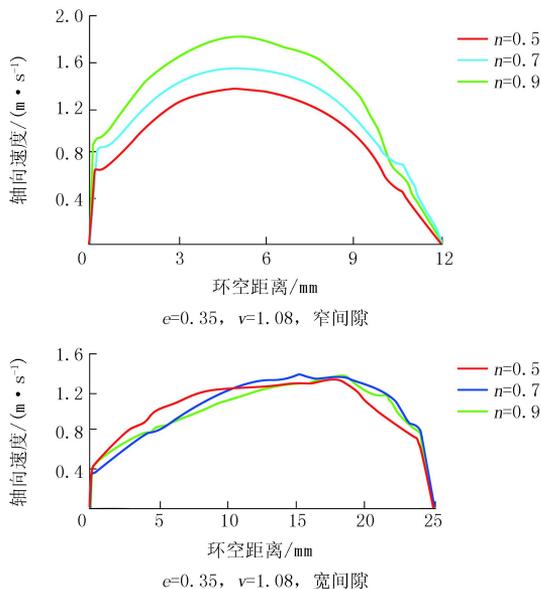


图14 不同流性指数窄宽间隙轴向速度分布曲线

(2) 提高冲洗液的流性指数,有利于冲洗液在窄间隙的流动,减小混合界面的长度,利于冲洗液对钻井液的顶替;

(3) 冲洗液的稠度增加,有利于提高冲洗液顶替钻井液的顶替效率,但是不利于对泥饼的冲洗;

(4) 由于冲洗液在固井作业中的主要作用是顶替钻井液和冲洗泥饼,因此为保证固井质量优良,建议提高冲洗液的流性指数,适当增加稠度系数,以保证冲洗干净井壁的同时又可以有较高的顶替效率;

(5) 对于存在偏心的水平井,适当增大冲洗液密度,使之与钻井液形成正密度差关系,能够很好地克服宽窄边效应,提高水平井的整体顶替效率。

参考文献:

- [1] 石强,邵唤彬. 提高水泥环第二界面胶结质量的固井技术[J]. 海洋石油,2005,25(4):84-87.
- [2] 李娟. 不同流态的顶替效率的数值模拟研究[D]. 山东青岛: 中国石油大学(华东),2009.
- [3] 高永海,孙宝江,赵欣欣,等. 前置液流变性对顶替界面稳定性影响的数值模拟[J]. 中国石油大学学报,2007,31(6):51-54.
- [4] 杨建波,邓建民,冯予淇,等. 低速注水泥时密度差对顶替效率影响规律的数值模拟研究[J]. 石油钻探技术,2008,36(5):62-65.
- [5] 陶文铨. 数值传热(第2版). 陕西西安:西安交通大学出版社,2001:351-352.
- [6] 王福军. 计算流体力学分析——CFD软件原理与应用. 北京:清华大学出版社,2004:39-43.
- [7] 李明忠,王成文,王长权,等. 大斜度井偏心环空注水泥顶替数值模拟研究[J]. 石油钻探技术,2012,40(5):40-42.
- [8] 刘崇建,黄柏宗,徐同台,等. 油气井注水泥理论与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2001:295-297.
- [9] 刘希圣. 钻井工艺原理:下册[M]. 山东东营:中国石油大学出版社,1988:106-111.
- [10] 郑永刚,方铎,郝俊芳. 水平井注水泥的理论与实验研究[J]. 水动力学研究与进展,1996,11(1):19-23.
- [11] 张松杰,薛亮,汪志明,等. 正密度差对水平井偏心环空顶替影响规律研究[J]. 科学技术与工程,2013,13(4):1011-1015.