

大位移井旋转套管固井顶替模拟分析

王金堂¹, 孙宝江¹, 李昊¹, 曹成章², 彭志刚², 徐渴望¹

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257017)

摘要: 旋转套管固井可以改变顶替过程中流体的流场, 增加周向的旋流和回流作用, 更好地保障顶替界面稳定性, 提高固井顶替效率。借助计算流体力学软件对大位移井旋转套管固井顶替进行数值模拟, 并得到不同井斜角和井径扩大率条件下的最低套管旋转转速。结果表明: 同一套管旋转速度, 切向速度随着无量纲环空半径的增加而降低, 随着井斜角的增加, 截面旋流数在不同位置处各异, 但总体趋于减小, 套管旋转固井顶替效率明显改善, 井斜角越大, 改善效果越好; 偏心率越大, 环空同一位置处旋流数越大, 窄间隙的旋流数明显高于宽间隙的旋流数, 在偏心率大于0.4以后, 顶替效率增加效果明显; 环空截面同一位置处, 井径扩大率越大, 其产生的旋流数越大, 旋流程度增强, 有利于水泥浆固井顶替; 采用旋转套管固井能有效改善复杂井眼条件下大位移井固井顶替质量和顶替效率。

关键词: 大位移井; 旋转套管; 旋流强度; 顶替效率; 数值模拟

中图分类号: TE 931.2 **文献标志码:** A

引用格式: 王金堂, 孙宝江, 李昊, 等. 大位移井旋转套管固井顶替模拟分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(3): 89-97.

WANG Jintang, SUN Baojiang, LI Hao, et al. Simulation analysis of rotating-casing cementing displacement in extended reach well[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3): 89-97.

Simulation analysis of rotating-casing cementing displacement in extended reach well

WANG Jintang¹, SUN Baojiang¹, LI Hao¹, CAO Chengzhang², PENG Zhigang², XU Kewang¹

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

2. Institute of Drilling Technology, SINOPEC Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying 257017, China)

Abstract: Rotating-casing cementing can alter the fluid flow field in displacement process and increase circumferential effect of whirl and reflux, which assure the better stability of the displacement interface and improvement of displacement efficiency. The rotating-casing cementing displacement in extended reach well was simulated by computational fluid dynamics software, through which the different deviation angles and the lowest casing rotation speed at the hole-diameter enlargement rate were obtained. The results demonstrate that the tangential velocity is reduced with the increase of the dimensionless radius of annulus at the same casing rotation speed. And as the deviation angle increase, the swirl numbers are different and generally tended to be declined in the flow sections. The displacement efficiency of rotating-casing cementing is improved significantly, and the larger the drift angle, the better the effect of improvement. Also, the greater eccentricity results in the larger swirl number in the same section. The swirl number in narrow is distinct larger than that in wide gap. When the eccentricity is greater than 0.4, the displacement efficiency increases significantly. At the same annular section, the bigger hole-diameter enlargement rate causes the larger swirl number, and the degree of rotational flow is enhanced, which is favorable to the slurry cementing displacement. Rotating-casing cementing has a great improvement of well-cementing quality and displacement efficiency in extended reach well under the bad hole conditions.

收稿日期: 2015-01-22

基金项目: 国家“863”计划项目(2012AA091501); 中央高校基本科研业务费专项(15CX06020A); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT1086)

作者简介: 王金堂(1988-), 男, 博士研究生, 研究方向为油气井流体力学与工程。E-mail: wangjintang163@126.com。

Keywords: extended reach well; rotating casing; swirling intensity; displacement efficiency; numerical simulation

与直井相比,大位移井具有井段长、井斜大的特点^[1-3]。在现场实践中发现,大位移井的固井质量操作难度大^[3,4],在斜井眼及水平段的条件下,套管总是贴近井壁向下一侧,受摩擦力影响,上提、下放阻力大,套管不易居中;水泥浆析水上移,固井顶替效率低,从一定程度上影响了油井的寿命。旋转套管固井顶替技术可以改变顶替过程中流体的流场,增加周向和轴向的旋流、回流作用,极大地改善固井顶替效率,提高固井质量。针对环空流体螺旋流动,Rivlin^[5]推导出了黏弹性流体同心环空螺旋流动速度分布关系式;Ballal等^[6]忽略惯性力的影响,应用二阶 Rivlin-Ericksen 本构方程分析了黏弹性流体在偏心环空内管旋转时,螺旋流的流函数和轴向速度的解析解。张海桥等^[7-10]针对非牛顿流体环空螺旋流进行了理论推导和实验研究,并得到了非牛顿流体环空螺旋流的精确解。对于旋转套管固井顶替过程,Clark^[11]通过实验验证了活动套管可以较大幅度提高固井顶替效率;郑永刚^[12-13]分析了旋转和上下活动套管对水泥浆及钻井液在偏心环空中的流场分布,及其对固井顶替效率的影响规律;王显诚等^[14]通过求解定长不可压缩流体的 N-S 方程,探讨了旋转套管时固井顶替机制;赵良刚等^[15]分析了旋转尾管固井在现场应用的优点;Mark等^[16]通过建立 3D 环空井眼,获得了直井段套管旋转时水泥浆顶替界面和环空截面的流速分布;步玉环等^[17]通过数值计算得出了旋转套管最小转速与环空间隙的关系,并求解出环空中水泥浆旋转速度径向分布。非牛顿流体环空螺旋流动以宾汉和幂律流体为主,而 3 参数赫巴流体的水泥浆^[18]的流动参数难以确定。大位移井固井顶替过程为水泥浆顶替钻井液的两相流动,笔者基于计算流体力学多相流动理论与方法,考虑 3 参数的赫巴流体的水泥浆和钻井液,应用数值模拟软件得到套管旋转情况下不同井斜角、偏心度、井眼扩大率速度分布,考察其对大位移井固井顶替效率的影响。

1 几何模型的建立及网格划分

1.1 几何模型

根据胜利油田桩 129 大位移井的完井资料,采用三维空间模型,计算区域为长度 10 m、外径为 0.2159 m、内径 0.1397 m 的环空流道。可以根据计算需要,改变井斜角、无量纲偏心度、井径扩大率

的环空流道。计算区域内模拟的顶替流体为水泥浆,其密度为 1900 kg/m³,动力黏度为 90 mPa·s;被顶替流体为钻井液,其密度为 1100 kg/m³,黏度为 20 mPa·s。对于高温高压下的水泥浆体系,宾汉模型和幂律模式均不能充分反映水泥浆的流变特性,实验研究表明,水泥浆流变模式可采用 Herschel-Bulkley 带屈服值的幂律模式^[18],计算得到其屈服值 τ_0 为 18 Pa,稠度系数 K 为 0.64 Pa·s^{*n*},流性指数 n 为 0.756;钻井液屈服值 τ_0 为 5 Pa,稠度系数 K 为 0.43 Pa·s^{*n*},流性指数 n 为 0.633。

1.2 网格划分

环空流道流场的 CFD 计算是对偏微分方程的近似求解,为了使结果更接近于实际,网格的数目应足够大到随着网格数目的增加计算结果不再有显著的变化为止。在满足网格密度的条件下,应当尽量减少计算量,提高计算收敛的稳定性和收敛速度。环空流道流场采用结构化网格,网格数为 15 万。环空流道的网格划分如图 1 所示。

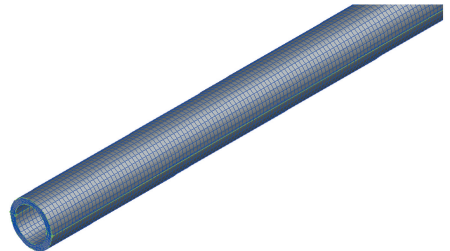


图 1 环空流道流场网格划分

Fig. 1 Annulus flow field mesh generation

2 固井顶替旋转套管理论模型

2.1 基本控制方程

针对井眼环空,模型如图 2 所示,建立流动控制方程。方程包括连续性方程和动量方程,考虑到工程上的泵入量条件下一一般为湍流状态,在模拟计算时湍流计算采用 $k-\varepsilon$ 模型^[19-20]。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0; \quad (1)$$

运动方程:

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\frac{2}{3} \mu \nabla \cdot V \right) + \rho g \cos \theta; \quad (2)$$

湍动能 k 方程:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M; \quad (3)$$

湍动能耗散 ε 方程:

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (4)$$

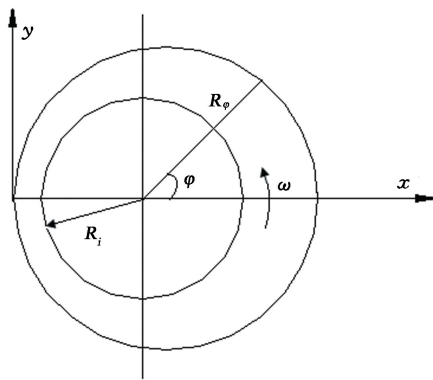


图2 套管旋转环空流动分析

Fig.2 Rotating-casing annulus flow analysis

对于两相流有

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2. \quad (5)$$

式中, ρ 为流体密度, kg/m^3 ; α_1 、 α_2 分别为两相的质量分数; ρ_1 、 ρ_2 分别为两相的密度, kg/m^3 ; t 为时间项, s ; u 为速度, m/s ; p 为压力; Pa ; S_T 为黏性耗散; G_k 表示由于平均速度梯度引起的湍动能产生; G_b 表示由于浮力影响引起的湍动能产生; Y_M 表示可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散的影响; μ_t 为湍流黏性系数, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ 。

2.2 辅助方程及边界条件

辅助方程包括赫巴流体本构方程、偏心环空任意半径 R_φ 关系式、任意半径 R_φ 处的旋转角速度和偏心率模型。

(1) 赫巴流体本构方程:

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n; \quad (6)$$

(2) 偏心环空任意半径 R_φ 关系式:

$$R_\varphi = \sqrt{R_{in}^2 - e^2 \sin^2 \varphi} + e \cos \varphi + R_{in} - R_{out}; \quad (7)$$

(3) 任意半径 R_φ 处的旋转角速度:

$$w = - \int_{R_i}^{R_\varphi} \frac{1}{R_\varphi} \left(\frac{\tau - \tau_0}{K} \right)^{\frac{1}{n}} dR_\varphi + \Omega; \quad (8)$$

(4) 偏心率模型:

理想情况下,套管与井眼中心应重合。但实际工程中,套管与井眼中心往往有偏离,无量纲偏心率定义 e 为

$$e = \frac{\varepsilon}{R_{out} - R_{in}}. \quad (9)$$

式中, τ_0 为静切力, Pa ; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; K 为稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$; n 为流性指数, 无因次; φ 为周向角, rad ; R_{out} 为环空外半径, m ; R_{in} 为环空内半径, m ; Ω 为套管旋转角速度, rad/s ; ε 为偏心距, m 。偏心率越大,则环空中宽隙越宽,窄隙越窄。偏心率为零时,表示同心环空;偏心率为 1 时,套管与井壁一侧接触。

边界条件:入口采用速度入口边界条件,可根据不同的顶替排量设定入口速度。出口为压力边界,表压为 0;固壁采用无滑移边界条件,壁面上 $u = 0$,井眼壁面粗糙度 7.62 mm,套管壁面粗糙度 0.15 mm。

3 模拟结果分析

3.1 不同井斜角

大位移井井身结构复杂,大斜度井段长,井斜角变化幅度大。根据现场调研,环空顶替流速在 0.1 ~ 2.0 m/s 内,模拟时设置顶替流速为 1.0 m/s ,重力方向沿 x 轴负方向,改变井斜角包含 $0^\circ \sim 90^\circ$ 分别进行模拟,得到不同井斜角条件套管旋转对大位移井固井顶替的影响规律。图 3 不同井斜角时不同套管旋转速度沿 x 轴切向速度分布。

从图 3 看出,由于套管的旋转作用使得环空流体产生了切向速度,靠近套管剪切效果更为明显。井斜角的改变对环空切向速度分布产生较大影响,对于 0° 井斜角,随着套管旋转速度的增加,环空流体切向速度也随之增加;同一套管旋转速度,切向速度随着无量纲环空半径的增加而降低,贴近井壁附近趋于稳定。对于 90° 井斜角,随着套管旋转速度的增加,环空流体切向速度也随之增加,但同一旋转速度下,切向速度随着无量纲环空半径的增加先降低后增加,靠近井壁一侧出现了回流,能够破坏钻井液的胶凝结构,更加有利于水泥浆固井顶替效率的提高。

套管在井眼内旋转,使得环空流体在管道中做螺旋运动,为了衡量环空流体旋流强度,引入无量纲旋流数 S_n ^[21],具体表达式为

$$S_n = \frac{\int_0^{R_{out}} \rho v_z v_t R_\varphi^2 dR_\varphi}{R_{out} \int_0^{R_{out}} \rho v_z^2 R_\varphi dR_\varphi}. \quad (10)$$

式中, v_z 为轴向速度, m/s ; v_t 为切向速度, m/s 。旋流数反应井眼环空切向运动与轴向运动的相对强弱,旋流数越大,旋流强度越高,对井壁附近钻井液的顶替效果越好。图 4 为不同井斜角套管以 40 r/

min 旋转时,井眼环空截面一半处的旋流数对比。

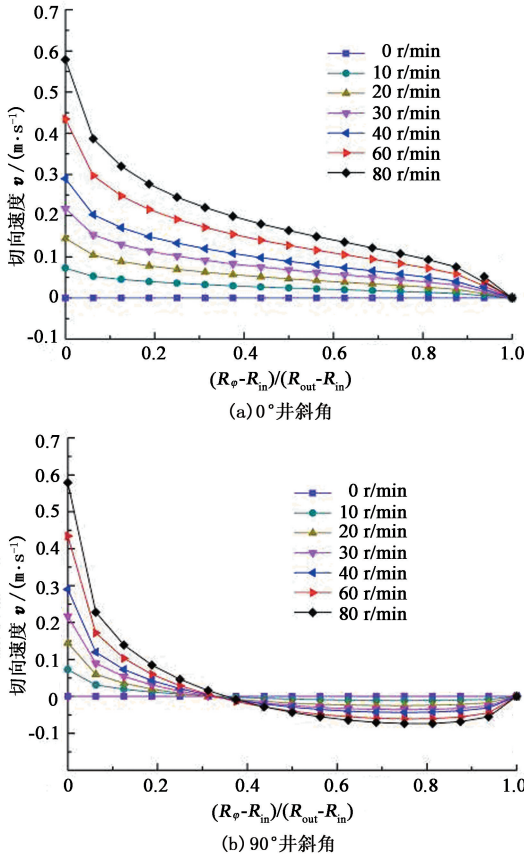


图3 不同套管旋转速度 x 轴方向切向速度分布
Fig.3 Tangential velocity distribution in x-axis direction with different casing rotation speeds

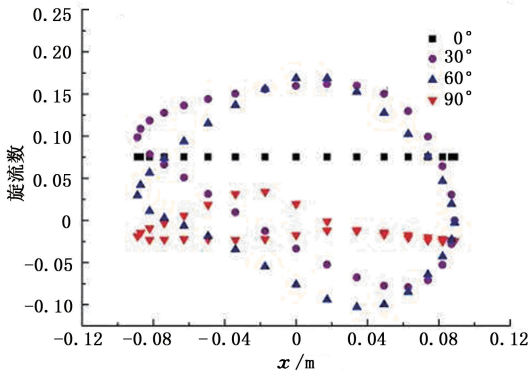


图4 不同井斜角井眼环空截面一半处的旋流数对比
Fig.4 Swirl number comparison at wellbore annulus half-section with different well deviation degrees

从图4中可以看出,由于套管的旋转和重力的影响,井斜角不同,产生的旋流数差别较大。0°井斜角由于重力方向与轴向速度反向,截面旋流数均为0.0753,旋流强度均匀,有利于水泥浆固井顶替;随着井斜角的增加,截面旋流数在不同位置处,旋流数不同,但总体趋于减小,并且靠近下井壁的 y 轴正方向环空旋流数略高于靠近下井壁的 y 轴负方向环空

旋流数。这是由于重力方向沿 x 轴负方向,靠近下井壁井眼环空套管旋转产生的切向力与重力的合力沿环空截面方向各异,y 轴正方向贴近井壁一侧合力与螺旋流动方向一致,旋流数较大,增加了周向的旋流强度,能够及时冲刷滞留在井壁的泥饼,提高了固井顶替效率。数值模拟也得到不同井斜角条件下能够有效冲刷滞留在井壁泥饼最低套管旋转转速,如图5所示。

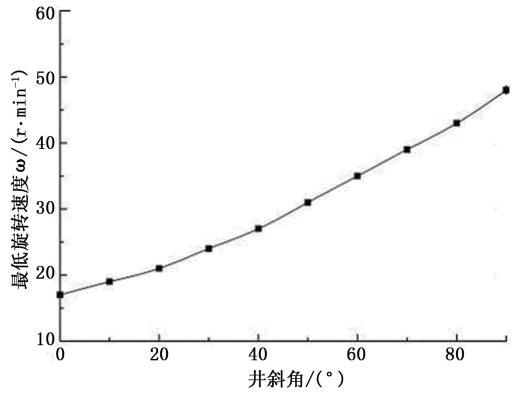


图5 不同井斜角下最低套管旋转转速
Fig.5 Minimum casing rotation speed under condition of different well deviation degrees

从图5看出,由于井斜角的增大使得水泥浆界面更加不稳定,增加套管旋转转速更有利于冲刷井壁泥饼;在同一环空间隙条件下,井斜角越大,所需的最低套管旋转转速越高,但差异不明显,由0°井斜角的17 r/min,增加到90°井斜角的48 r/min。在实际固井过程中,根据不同开次井眼状况,可确定合适的最低套管旋转转速。最终得到的不同井斜角、不同套管旋转速度顶替效率对比结果见图6。

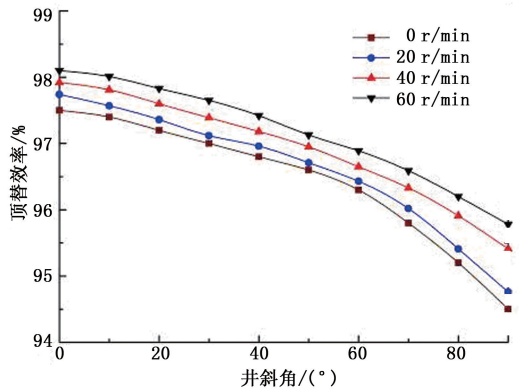


图6 不同井斜角、不同套管旋转速度顶替效率对比
Fig.6 Displacement efficiency comparison with different well deviation degrees and casing rotation speed

从图6看出,套管不旋转时,随着井斜角的增大,顶替效率逐渐降低,特别是井斜角高于60°以

后,顶替效率下降十分明显,从 96.32% 下降到 94.51%,并且随着顶替时间的增加,这种井斜角对固井顶替的影响会更加明显。随着套管转速的增加,固井顶替效率明显改善,井斜角越大,改善效果越好;套管以 40 r/min 旋转时,90°井斜角下顶替效率可以从 94.51% 提高到 95.43%。在相同注替条件下,大斜度井段和水平井段的注水泥顶替效率要比垂直井段差。在大位移井大斜井段固井顶替过程中,在增大水泥浆的顶替排量的同时,旋转套管可以更好地保证顶替界面稳定性,提高固井顶替效率。

3.2 不同偏心率

套管柱在井下不可避免会发生偏心,使得截面环空流道发生变化,对水泥浆在环空中的流速分布产生影响。套管偏心将导致环空窄边的流动阻力增大,流速降低,不易实现水泥浆的紊流或塞流顶替^[22]。在井斜角为 90°条件下,通过改变无量纲偏心率 0.1~0.8 和套管旋转速度 0~80 r/min,得到不同套管旋转速度下切向速度分布和不同偏心率条

件下环空截面一半处的旋流数分布。图 7 为偏心率在 0.5 条件下不同套管旋转速度沿 x 轴正、负方向切向速度分布。

从图 7 看出,在 x 轴正方向范围内即环空间隙较大的空间区域,套管旋转引起周围切向速度范围较小;无量纲环空半径的增加至 0.1 后,切向速度差别较小;对于 x 轴负方向即环空窄间隙区域,不同套管旋转速度对于切向速度分布差别明显,随着套管旋转速度的增加,环空流体切向速度也随之增加,靠近井壁一侧仍有一定的切向速度,使井底不流动的钻井液产生旋流。由于偏心,沿 x 轴速度分布不一致,套管旋转时,窄间隙的钻井液由于旋流的作用将带入宽间隙,而宽间隙的水泥浆被带入窄间隙,因此套管旋转使得偏心环空窄间隙水泥浆固井顶替更均匀向前推进,达到很好的固井顶替效果。为综合对比分析旋转套管时不同偏心率旋流程度,计算得出了不同偏心率条件下环空截面一半处的旋流数分布,如图 8 所示。

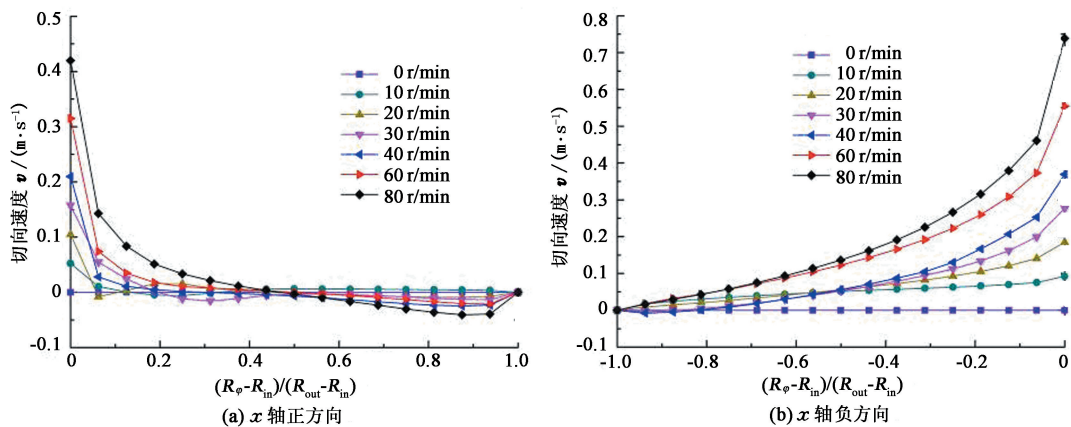


图 7 偏心度为 0.5 时不同套管旋转速度切向速度分布

Fig. 7 Tangential velocity distribution under eccentricity being 0.5 with different casing rotation speeds

从图 8 看出,偏心度的变化使得环空间隙宽度各异,偏心度越大环空同一位置处旋流数越大,窄间隙的旋流数明显高于宽间隙的旋流数,当偏心度大于 0.6 时,这种差异更加明显。受套管偏心的影响,窄间隙的轴向流速迅速降低,而对于切向速度则不受影响,使总的旋流数随着偏心度的增大而增加;并且在靠近井壁一侧,套管旋转使得钻井液在边壁的反作用下出现回流,反冲窄间隙处滞流钻井液作用随着偏心度的增加越强;因此偏心度越大,套管旋转对改善水泥浆固井顶替效果越好。图 9 从环空流场和顶替界面分布方面做出更直观的解释。

从图 9 看出,偏心度为 0.5 时套管以 40 r/min 旋转时,由于套管的旋转使得环空流场整个流线成

螺旋状分布,局部会有涡流的产生,增加了流体在环空中的紊流程度,有助于水泥浆的均匀顶替。在偏心度为 0.5、不同套管旋转速度顶替界面分布中,套管的旋转速度越高,黏附在井壁的滤饼和环空滞留的钻井液能更好地被水泥浆顶替出,使得钻井液的滞留区域明显降低,顶替界面出现“锥进”现象减弱,界面更加稳定。

套管发生偏心时,影响固井顶替效率的因素主要是环空间隙滞留的钻井液^[14],分为由于顶替流速低滞留井内的钻井液近壁滞留和套管偏心而形成的窄边局部钻井液滞留。对于发生偏心的井眼环空,截面环空间隙不一致,很难确定一个适合于变环空间隙的有效冲刷滞留在井壁泥饼最低套管旋转转

速。图10为90°井斜角、不同偏心度和套管旋转转

速条件下顶替效率对比。

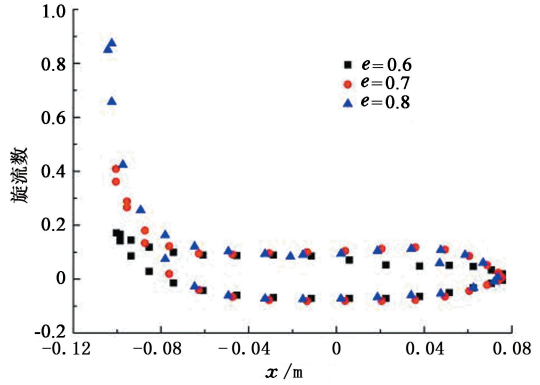
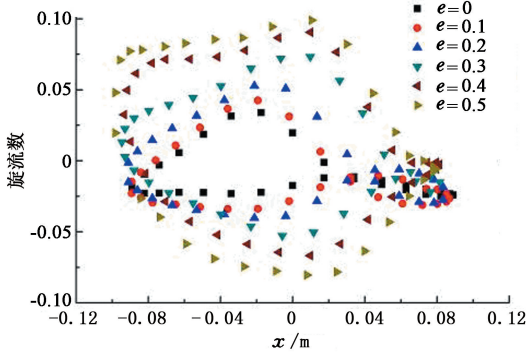


图8 不同偏心度下旋流数

Fig.8 Swirl number under different eccentricity

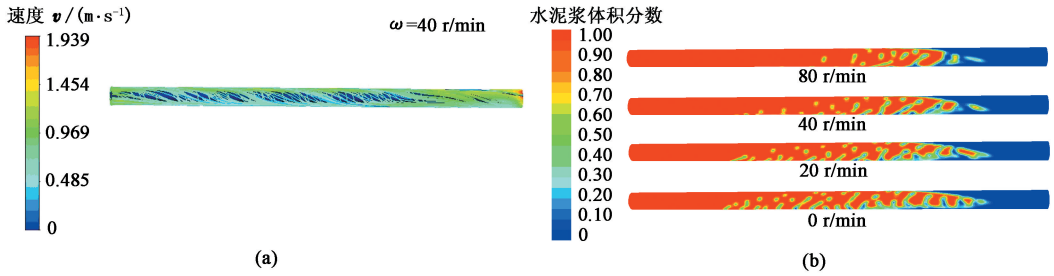


图9 偏心度为0.5时环空流场和顶替界面分布

Fig.9 Displacement interface distribution under condition of 0.5 eccentricity with different casing rotation speeds

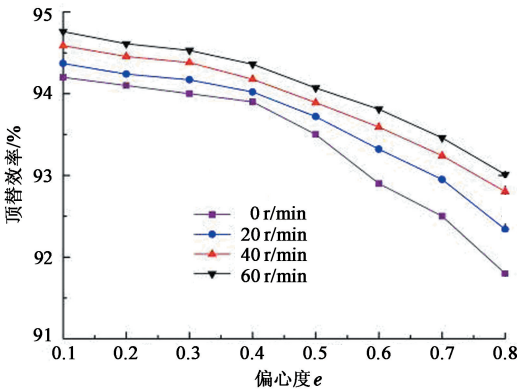


图10 不同偏心度和套管旋转转速条件下顶替效率对比

Fig.10 Displacement efficiency comparison with different eccentricities and casing rotation speeds

从图10看出,90°井斜角情况下套管不旋转时,随着偏心度的增加而降低,特别是在偏心度大于0.4以后,顶替效率下降趋势非常显著;当套管旋转时,随着旋转速度的增加,顶替效率有很大改善,偏心度越大改善效果越好,因此现场固井顶替过程中,如果实现旋转套管固井,可以部分替代刮泥器来清除井壁滤饼,减少施工程序、保证安全下套管和井壁稳定,提高固井顶替效率。

3.3 不同井径扩大率

钻井过程中发生井径扩大的因素包括:地层的

胶结差、结构松散和高钻井液返速破坏井壁的稳定。钻井过程中产生的不规则井眼使得套管与井壁的环空截面变化复杂,水泥浆流速不稳定。井径扩大率的变化对固井顶替效果产生较大的影响。在井斜角为90°条件下,通过改变井径扩大率10%~40%和套管旋转速度0~80 r/min,得到不同套管旋转速度下切向速度分布和不同井径扩大率条件下环空截面一半处的旋流数分布。图11为井径扩大率为30%时不同套管旋转速度沿x轴切向速度分布。

从图11看出,随着套管旋转速度的增加,环空流体切向速度也随之增加;同一旋转速度下,切向速度随着无量纲环空半径的增加而迅速降低,并且在无量纲环空半径到达0.5以后切向速度减弱。在井眼环空变径处水泥浆流速发生变化,环空截面很容易形成流体速度为0的流体滞留区,钻井液无法流动,由于套管的旋转,产生的切向速度可以部分或完全将钻井液带离井底。为了更清晰地表征套管旋转产生的旋流强度,计算得出环空截面中心处不同井径扩大率时的旋流数,如图12所示。

套管以40 r/min旋转对不同井径扩大率的影响非常明显;环空截面同一位置处,井径扩大率越大,其产生的旋流数越大。这是由于井径扩大处轴

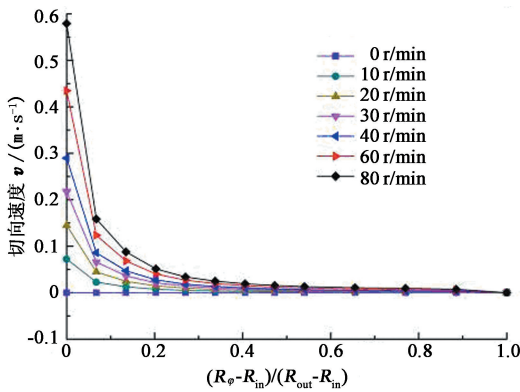


图 11 井径扩大率为 30% 时不同套管旋转速度 x 轴切向速度分布

Fig. 11 Tangential velocity distribution in x -axis direction under 30% hole-diameter enlargement rate with different casing rotation speeds

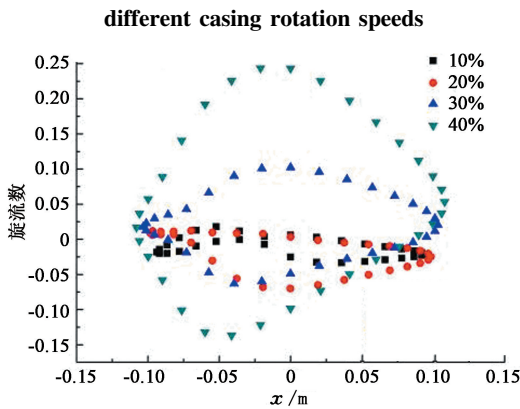


图 12 不同井径扩大率时的旋流数

Fig. 12 Swirl number under different hole-diameter enlargement rates

向流速迅速降低,对于切向速度的影响则非常小,整体旋流程度增强。总的来说,套管旋转更加有利于井眼缩径过程中的滞留钻井液的顶替。现场实际井眼不同位置处井径扩大率也有差异,各种范围的井径扩大井眼组合在一起组成“大肚子”井眼或者“糖葫芦”井眼^[17],如果不采取措施,固井顶替效率难以得到保证。旋转套管固井可以较大程度地改善这种状况,提高井径扩大率固井顶替效率。

图 13 为 90°井斜角、不同井径扩大率下所需的最低套管旋转转速。

从图 13 看出,随着井径扩大率的增大,所需的最低套管旋转转速急剧升高,由井径扩大率为 0 的 48 r/min 升高到井径扩大率为 40% 的 255 r/min。当井径扩大率升高到一定程度,大位移井固井顶替现场施工作业很难满足要求。在有井径扩大的情况下,尽量增加套管旋转转速,以提高固井质量。图 14 为 90°井斜角、不同井径扩大率和套管旋转速度条件下顶替效率对比。

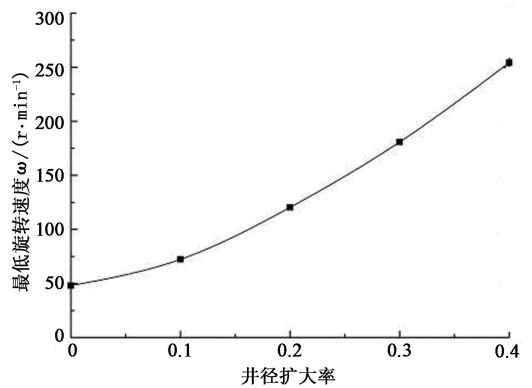


图 13 不同井径扩大率下最低套管旋转转速

Fig. 13 Minimum casing rotation speed with different hole-diameter enlargement rates

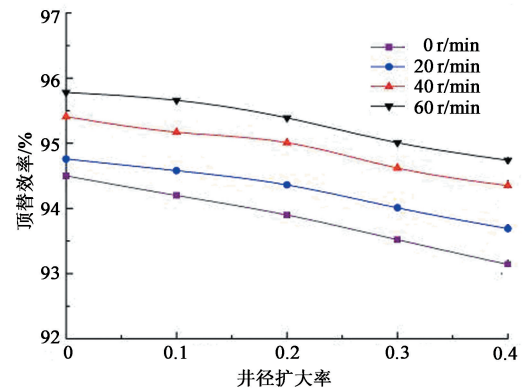


图 14 不同套管旋转速度下顶替效率对比

Fig. 14 Displacement efficiency comparison with different casing rotation speeds

从图 14 看出,井径扩大率越大固井顶替效率越低;套管旋转速度增加使顶替效率得到改善。套管不旋转时,井径扩大率为 30% 的顶替效率只有 93.52%,水泥浆在井径扩大段与正常井段交接处残余部分不流动的钻井液,无论提高顶替排量都很难完全顶替干净;增加套管旋转以后,滞留的钻井液在旋流的作用下开始流动,并逐渐发展为螺旋流,套管以 40 r/min 旋转时井径扩大率为 30% 的顶替效率可以达到 94.62%。

综上所述,模拟分析表明套管旋转速度越大,其旋流强度越高,顶替效果越好,但实际现场固井过程中应综合考虑套管旋转的扭矩、水泥浆和钻井液流体的性质和井壁稳定性的共同作用关系,确定合适的套管旋转转速,保证大位移井各种复杂井眼条件下水泥浆固井质量满足要求。

4 结论

(1)套管的旋转作用使环空流体产生了切向速

度,靠近套管剪切效果更为明显;同一套管旋转速度,切向速度随着无量纲环空半径的增加而降低,贴近井壁附近趋于稳定。随着井斜角的增加,截面旋流数在不同位置处各异,但总体趋于减小,并且靠近下井壁的 y 轴正方向环空旋流数略高于靠近下井壁的 y 轴负方向环空旋流数;井斜角越大,所需的最低套管旋转转速越高,但差异不明显;套管旋转固井顶替效率明显改善,井斜角越大,改善效果越好。

(2) 由于偏心,沿 x 轴速度分布不一致,套管旋转时,窄间隙的钻井液由于旋流的作用将带入宽间隙,而宽间隙的水泥浆被带入窄间隙;偏心度越大环空同一位置处旋流数越大,窄间隙的旋流数明显高于宽间隙的旋流数,当偏心度大于 0.6 时,这种差异更加明显;当套管旋转时,不同偏心度下顶替效率有很大改善,特别是在偏心度大于 0.4 以后,顶替效率增加效果明显。

(3) 在井眼环空变径处水泥浆流速发生变化,环空截面很容易形成流体速度为 0 的流体滞留区,钻井液无法流动,由于套管的旋转,产生的切向速度可以部分或完全将钻井液带离井底;并且环空截面同一位置处,井径扩大率越大,其产生的旋流数越大,旋流程度增强,有利于水泥浆固井顶替。

参考文献:

[1] 吴爽,李骥,张焱. 大位移井技术研究的现状分析[J]. 石油钻探技术,2002,30(5):17-19.
WU Shuang, LI Ji, ZHANG Yan. Current situation of extended-reach drilling techniques [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002,30(5):17-19.

[2] 蒋世全. 大位移井技术的发展现状及启示[J]. 中国海上油气(工程),1999,11(3):1-8.
JIANG Shiquan. Extended reach well technology development status and Inspiration [J]. China Offshore Oil and Gas (Engineering), 1999,11(3):1-8.

[3] 连吉弘,康建平. 大位移井固井技术分析[J]. 长江大学学报:自然科学版,2010,7(1):205-211.
LIAN Jihong, KANG Jianping. Extended reach well cementing technical analysis [J]. Journal of Yantze University (Natural Science Edition), 2010,7(1):205-211.

[4] 王瑞和,李明忠,王成文,等. 油气井注水泥顶替机制研究进展[J]. 天然气工业,2013,33(5):69-74.
WANG Ruihe, LI Mingzhong, WANG Chengwen, et al. Research progress in the cementing displacement mechanism [J]. Natural Gas Industry, 2013,33(5):69-74.

[5] RIVLIN R S. Further remarks on the stress-deformation relations for isotropic materials [J]. J Rat Mech Anal,

1955(4):681-702.

[6] BALLAL B Y, RIVLIN R S. Flow of a viscoelastic fluid between eccentric rotating cylinders[J]. Journal of Rheology, 1976,20(1):65-101.

[7] 张海桥,吴继周. 非牛顿流体偏心环空螺旋流的解析解[J]. 应用数学和力学,1974,15(7):627-638.
ZHANG Haiqiao, WU Jizhou. Analytical solutions of the helical flow of non-newtonian fluid in eccentric annular space[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1974, 15(7):627-638.

[8] 崔海清,刘希圣. 非牛顿流体偏心环形空间螺旋流速度分布[J]. 石油学报,1996,17(2):76-82.
CUI Haiqing, LIU Xisheng. Velocity distribution of helical flow of non-newtonian fluid in eccentric annuli [J]. Acta Petrolei Sinica, 1996,17(2):76-82.

[9] 李兆敏. 黏弹性对流体非正常流动规律的影响[J]. 钻井液与完井液,1998,15(2):3-5.
LI Zhaomin. Influence of viscoelasticity on fluid abnormal motion [J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 1998, 15(2): 3-5.

[10] 郑应人. 非牛顿液体环空螺旋流的精确解[J]. 石油学报,1998,19(2):91-96.
ZHENG Yingren. Exact solution of helical flow for non-newtonian fluid in annulus [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998,19(2):91-96.

[11] NELSON E B. Well cementing [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1990.

[12] 郑永刚. 偏心环空旋转套管流场及注水泥顶替效率的影响[J]. 西部探矿工程,1994,6(2):33-37.
ZHENG Yonggang. The rotating casing flow field in eccentric annuli and its effecting on displacement efficiency of cementing [J]. West-China Exploration Engineering, 1994,6(2):33-37.

[13] 郑永刚,郝俊芳,王治平. 活动套管提高注水泥顶替效率的理论分析[J]. 天然气工业,1994,14(2):48-50.
ZHENG Yonggang, HAO Junfang, WANG Zhiping. Analysis of moving casings to improve displacement efficiency in cementing job [J]. Natural Gas Industry, 1994,14(2):48-50.

[14] 王显诚,丁保刚,王丽峰,等. 旋转套管对固井质量的影响[J]. 石油钻探技术,1995,23(1):47-49.
WANG Xiancheng, DING Baogang, WANG Lifeng, et al. Casing rotation improves cementing quality [J]. Petroleum Drilling Techniques, 1995,23(1):47-49.

[15] 赵良刚,宋健. 旋转尾管固井工艺在深井中的应用[J]. 石油钻探技术,2006,34(6):39-41.
ZHAO Lianggang, SONG Jian. Application of the rota-

- ting-liner cementing technique in deep wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2006,34(6):39-41.
- [16] MARK S, ROBERT D, WILSON C. Modeling fluid interfaces during cementing using a 3D mud displacement simulator[C]//OTC 18513 Presented at the 2007 Offshore Technology Conference held in Houston, Texas, USA, 2007.
- [17] 步玉环,郭胜来,马明新,等. 复杂井眼条件下旋转套管速度对固井质量的影响[J]. *石油学报*, 2011,32(3):529-533.
BU Yuhuan, GUO Shenglai, MA Mingxin, et al. Influence of rotation casing speed on well-cement quality under the bad hole conditions[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011,32(3):529-533.
- [18] 王伟,黄柏宗. 高温高压下水泥浆的流变性及其模式[J]. *油田化学*, 1994,26(1):18-21.
WANG Wei, HUANG Baizong. Mathematical models for describing rheological behavior of cement slurries at high temperatures and high pressures and methods of determining parameters in them[J]. *Oilfield Chemistry*, 1994, 26(1):18-21.
- [19] 高永海,孙宝江,刘东清,等. 环空水泥浆顶替界面稳定性数值模拟研究[J]. *石油学报*, 2005,26(5):120-122.
GAO Yonghai, SUN Baojiang, LIU Dongqing, et al. Numerical simulation on stability of cement displacement interface in annulus[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005,26(5):120-122.
- [20] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004:19-26.
- [21] 邓迎寒,刘永长,刘会猛,等. 螺旋流排气管变型设计研究[J]. *柴油机设计与制作*, 2002(1):11-14.
DENG Yinghan, LIU Yongchang, LIU Huimeng, et al. Study on helical flow of the exhaust pipe variant design[J]. *Design & Manufacture of Diesel Engine*, 2002(1):11-14.
- [22] 刘崇建. 油气井注水泥理论与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2000:295-307.

(编辑 刘为清)