

固井冲洗液室内模拟评价方法研究

王乐顶^{1,5}, 王长在², 喻芬³, 尚锋⁴, 黄海鸿¹, 刘勇¹

(1. 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; 2. 中石油大港油田油气藏评价事业部, 天津 大港 300280; 3. 四川科宏石油天然气工程有限公司, 四川 成都 610200; 4. 中石油辽河油田曙光工程技术处, 辽宁 盘锦 124109; 5. 中石油渤海钻探塔里木钻井分公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:针对现有固井冲洗液评价方法对于油基钻井液冲洗情况评价存在不足的问题,运用环空壁面与改进装置内筒壁面处剪切速率相等的原理,研究出了一种适用于油基和水基钻井液条件的固井冲洗液室内评价新方法。室内模拟实验分析表明,该方法能更好地反映冲洗液的冲洗效率,并能模拟评价冲洗效率对固井第一或第二界面处胶结的影响情况。该方法操作方便,适用于油基和水基钻井液固井条件。

关键词:油基钻井液; 冲洗液; 评价方法; 剪切速率

中图分类号: P634.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2014)10-0054-04

Research on Evaluation Method of Laboratory Simulation of Cementing Flushing Fluid/WANG Le-ding^{1,5}, WANG Chang-zai², YU Fen³, SHANG Feng⁴, HUANG Hai-hong¹, LIU Yong¹ (1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation(Southwest Petroleum University), Chengdu Sichuan 610500, China; 2. Oil and Gas Reservoir Evaluation Division, Dagang Oilfield Branch Company, PetroChina, Dagang Tianjin 300280, China; 3. Sichuan Kehong Petroleum & Gas Engineering Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610200, China; 4. Shuguang Engineering Technology Department, Liaohe Oilfield Branch Company, PetroChina, Panjin Liaoning 124109, China; 5. Tarim Branch, Bohai Drilling Engineering Company, PetroChina, Korla Xinjiang 841000, China)

Abstract: The existing evaluation method of flushing fluid has some problems in evaluating the oil-base drilling fluid. This paper presents a new indoor evaluation method which would be suitable for evaluating both oil-based and water-based drilling fluids by using the principle of equal shear rate between annular wall and inner cylinder wall of improved device. Many indoor simulation experiments have demonstrated that this method can reflect flushing efficiency better; and by this method, the simulation evaluation can be made on influence of flushing efficiency to cementing conditions in the first or second bonding interface. This method has the advantage of convenient operation and is suitable for both water-based and oil-based drilling fluid cementing conditions.

Key words: oil-based drilling fluid; flushing fluid; evaluation method; shear rate

当前,随着人类对能源需求的日益增长,非常规能源在勘探开发中所占的比例越来越大。以页岩气钻井为例,为防止页岩水化膨胀以及水平段钻具卡钻等问题的出现,常采用油基钻井液或者仿油基钻井液。然而,现有的冲洗液评价方法主要有行业标准、旋转粘度计法等。这些方法主要针对水基钻井液,对于油基钻井液的冲洗效率和润湿反转情况还没有配套的评价方法。本文通过改进前人的评价方法研究出一种适用于油基和水基钻井液的新型固井冲洗液室内评价方法。该方法利用实际工程中的井身结构和平均环空返速来计算环空壁面(胶结界面)处的剪切速率,然后,依据计算出的剪切速率来选择室内评价实验应采用的参数。该评价方法操作简单,能够同时测得冲洗液的冲洗效率和模拟评价冲

洗效率对固井第一或第二界面处胶结的影响情况。

1 常用冲洗液评价方法

冲洗液作为前置液的一部分,在固井施工中起着至关重要的作用,能够剥离钻井液泥饼为水泥浆与胶结界面的良好胶结创造条件。常用的冲洗液评价方法主要有原行业标准^[1]、旋转粘度计法^[2]和王广雷等人研究的改进旋转粘度计法^[3]。

(1)原行业标准(SY/T 5374-2000)中推荐的冲洗液评价方法是用粘附有钻井液的圆模来模拟附有泥饼的套管,在1400 r/min下冲洗,称量冲洗前后粘附钻井液圆模的质量差之比计算冲洗液的冲洗效率。该方法转速较大,剪切速率约为2000~3000 s⁻¹,一般现场施工排量很难达到,不符合实际固井施工时

收稿日期:2013-10-12; 修回日期:2014-09-28

基金项目:国家科技重大专项课题“低渗油气田完井关键技术”(2011ZX05022)之“低渗气藏水平井固井长效封固关键技术研究”

作者简介:王乐顶(1986-),男(汉族),山东菏泽人,西南石油大学硕士研究生,中石油渤海钻探塔里木钻井分公司,石油与天然气工程专业,从事石油钻探工作,新疆库尔勒, wangding1899@163.com。

的环空返速对套管的清洗效率,也不能对固井二界面(井壁)的冲洗效果做出评价。

(2) 旋转粘度计法利用旋转粘度计外筒来对冲洗效率进行评价,转速为 300 r/min。此方法采用在外筒上粘附钻井液或者在外筒上捆绑附有钻井液失水后形成泥饼的滤纸和捆绑钢质筛网或砂纸(模拟固井界面粗糙度),然后置于冲洗液中旋转,称量冲洗前后粘附有钻井液的外筒质量差之比计算冲洗效率。由于外筒旋转时存在离心力,会对实验结果产生影响。该方法模拟的剪切速率单一(模拟壁面剪切速率为 340 s^{-1}),不能适应存在不同井身结构和环空返速下的剪切速率变化,有很大的局限性和偏差。

(3) 王广雷等人根据旋转粘度计的测量原理对其内筒进行了改造。该方法改进了外筒旋转的不足,通过改造内筒来计算冲洗效率。利用冲洗液相关的流变参数及对应的流体力学公式计算冲洗液在井下环空的壁面剪切应力,然后调整改进后的旋转粘度计转速来使内筒的壁面剪切应力与井下环空的壁面剪切应力相接近,并在这种转速下测量冲洗液对内筒的冲洗效率。该方法相比前两种方法有了很大进步,但旋转粘度计有限的转速限制了剪切应力的范围,而且不能对冲洗液使固井胶结界面润湿反转的情况做出评价。

上述 3 种评价方法都存在一定的不足之处,如转速过大、剪切速率单一、离心力的影响和不能对固井界面的润湿反转情况做出评价等。对于这些评价方法的改进,使其能够适用于评价冲洗液对油基钻井液冲洗效果的室内评价方法还未见报道。

2 新型冲洗液评价方法

目前国外冲洗液评价实验多采用旋转粘度计法^[6~10],针对上述评价方法存在的不足之处,有必要研究出一种新的冲洗液评价方法。在现有评价方法的基础上改进,将室内实验与现场工程施工设计相结合,并且能够针对冲洗液设计做出评价和指导,对油基和水基钻井液都有很好的适用性。

2.1 装置原理

通过计算工程中固井胶结界面处的剪切速率,

环空壁面处剪切速率^[4]为:

$$\gamma_1 = 12v / (D - d) \tag{1}$$

式中: γ_1 ——壁面处剪切速率, s^{-1} ; v ——环空平均返速, m/s ; D ——井眼直径, m ; d ——套管外径, m 。

常用外筒旋转型(Couette 系统)粘度计的内筒外表面处的剪切速率^[5]计算公式如下:

$$\gamma_2 = 0.20944\omega R_2^2 / (R_2^2 - R_1^2) \tag{2}$$

式中: γ_2 ——内筒外表面处剪切速率, s^{-1} ; ω ——外筒转速, r/min ; R_2 ——外筒内半径, mm ; R_1 ——内筒外半径, mm 。

流体在两个同轴圆筒体之间的环形空间流动近似模拟了冲洗液在套管和井壁之间的环形空间内流动(见图 1)。利用剪切速率相近为理论依据,用室内实验冲洗效果评价现场工程固井施工参数(环空间隙和平均返速)。

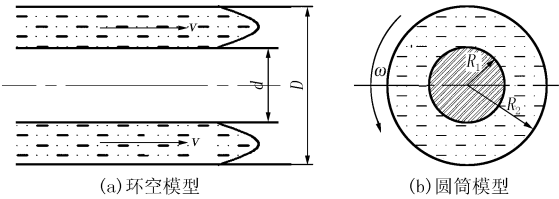


图 1 环空平均返速与圆筒环形空间流动示意

为了方便模拟固井第二胶结界面,以常见岩心外半径为内筒固定外半径,通过增大或减小外筒内半径尺寸来使内筒外表面处剪切速率减小或增大(见表 1),以及常见井身结构尺寸时不同平均返速下的壁面剪切速率值(见表 2)。

由表 1 和表 2 可见:(1)表 2 中 215.90 mm × 139.70 mm 的井身结构在 0.8 m/s 平均环空返速时对应的壁面剪切速率为 125.98 s^{-1} ,与表 1 中序号 2 组合在 100 r/min 时的内筒外表面处剪切速率 125.03 s^{-1} 相近似。(2)表 2 中 152.40 mm × 101.60 mm 的井身结构在 1 m/s 平均环空返速时对应的壁面剪切速率为 236.22 s^{-1} ,与表 1 中序号 4 组合在 600 r/min 时的内筒外表面处剪切速率 233.04 s^{-1} 相近似。从以上举例可以看出该装置对常见井身结构尺寸和不同环空平均返速下的剪切速率有很好的匹配性。

在模拟第一和第二固井胶结界面时,可以将

表 1 内筒外半径为 12.5 mm 时不同外筒半径下的剪切速率

序号	内筒外半径 /mm	外筒内半径 /mm	不同外筒转速下的剪切速率/ s^{-1}					
			600 r/min	300 r/min	200 r/min	100 r/min	6 r/min	3 r/min
1	12.50	13.40	968.01	484.00	322.69	161.33	9.68	4.84
2	12.50	13.70	750.18	375.09	250.06	125.03	7.50	3.75
3	12.50	14.00	619.63	309.81	206.54	103.27	6.20	3.10
4	12.50	18.40	233.04	116.52	77.68	38.84	2.33	1.17

表 2 常见井身结构尺寸时不同平均返速下的壁面剪切速率

序号	井眼直径×套管外径 /mm	环空间隙 /mm	不同环空平均返速下的壁面剪切速率/s ⁻¹					
			0.5 m/s	0.8 m/s	1 m/s	1.2 m/s	1.5 m/s	2 m/s
1	244.48×177.80	33.34	89.98	143.97	179.96	215.96	269.95	359.93
2	215.90×177.80	19.05	157.48	251.97	314.96	377.95	472.44	629.92
3	215.90×139.70	38.10	78.74	125.98	157.48	188.98	236.22	314.96
4	152.40×101.60	25.40	118.11	188.98	236.22	283.46	354.33	472.44
5	152.40×88.90	31.75	94.49	151.18	188.98	226.77	283.46	377.95

内筒选为钢材或岩心材料,将冲洗前和冲洗后的内筒进行胶结强度的测量,从而对胶结界面的润湿反转情况做出定量的判断。与改进旋转粘度计方法不同,该方法直接用岩心或钢柱作内筒(定子),只考虑冲洗液对内筒的剪切速率而不用测量冲洗液流变性能和内筒(定子)的旋转角度,减化了操作步骤。考虑到温度可能对液体流变性能的影响,在旋转时为了保持液体温度恒定,减少实验误差,配备了与旋转粘度计匹配的保温装置。

2.2 操作方法

根据旋转粘度计工作原理,通过改变内外筒半径来得到不同的剪切速率。利用与现场施工相近似的剪切速率在改进后的旋转粘度计上进行模拟、评价冲洗液的冲洗效果,同时为现场施工排量做出指导和优化。具体操作方法如下:

(1)计算剪切速率。根据现场的井身结构和预计平均环空返速,利用式(1)计算环空壁面的剪切速率。

(2)选择组合与转速。对照表 1,选择与现场施工相近的剪切速率下对应的内外筒组合及转速。

(3)计算冲洗效率。利用上述组合将现场所用钻井液在规定转速下旋转一定时间,在旋转之前称量内筒(钢柱或岩心)质量(M_1),用钻井液旋转之后,取出内筒,静置 1~2 min,待无钻井液滴下时,再次称重(M_2);用冲洗液替换钻井液,同样的转速旋转固定的时间(依据施工所达到的接触时间),冲洗后,同样静置 1~2 min,称重内筒质量(M_3),并代入公式(3)计算冲洗效率(A)。以上旋转过程中钻井液和冲洗液都处于保温装置内,使其温度保持在井内循环温度。

$$A = [(M_2 - M_3) / (M_2 - M_1)] 100 \tag{3}$$

式中: A ——冲洗效率,%; M_1 ——内筒质量,g; M_2 ——粘附钻井液后内筒质量,g; M_3 ——冲洗液冲洗粘附钻井液后内筒质量,g。

(4)润湿反转评价。将冲洗后的内筒(钢柱或岩心)放入剪切胶结测量装置内,灌入现场固井施工设计的水泥浆,然后放入一定温度、压力下养护

24 h,将测得数据代入公式(4),求出冲洗后的固井界面胶结强度(P_1)。

$$P = F / S \tag{4}$$

式中: P ——界面胶结强度,MPa; F ——抗压机测值,N; S ——水泥环胶结面积,mm²。

同样方法,将未粘附钻井液的钢柱或岩心放入剪切胶结测量装置内,测出其界面胶结强度(P_2),将上述胶结强度代入公式(5),计算冲洗液对胶结界面的模拟润湿反转率(R)。

$$R = (P_1 / P_2) 100 \tag{5}$$

式中: R ——胶结界面的模拟润湿反转率,%; P_1 ——冲洗后界面胶结强度,MPa; P_2 ——未粘附钻井液时的界面胶结强度,MPa。

(5)评价与调整。利用以上实验数据可以评价不同冲洗液的冲洗效果,优选最佳冲洗液。利用优选出的冲洗液,调整固井冲洗液施工设计(环空返速,冲洗液接触时间等)使其冲洗效果达到或接近 100%(见图 2)。

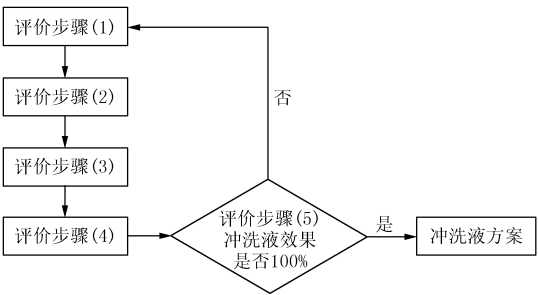


图 2 评价方法中评价与调整示意

图 2 中冲洗效果包括冲洗效率和界面模拟润湿反转率,如果是在水基钻井液固井条件下评价冲洗液,可以跳过评价步骤(4)。冲洗液方案指优选出的冲洗液类型、环空返速和冲洗接触时间等。

3 不同评价方法的评价结果比较

以某页岩气井为例,该井是针对页岩气勘探开发的水平井,三开水平段采用 Ø215.9 mm 钻头,Ø139.7 mm 套管固井。将行业标准、旋转粘度计法和新评价方法进行对比,同时与真实固井质量相近

似的胶结强度做参考。评价方法对比实验采用复配冲洗液(含表面活性剂) 与清水, 钻井液为油基钻井液(基本性能为: 密度 1.45 g/cm^3 , 漏斗粘度 86 s , 塑性粘度 $76\text{ mPa}\cdot\text{s}$, 动切力 16 Pa , 静切力 $2/5\text{ Pa}$, $n=0.658$, $K=0.573\text{ Pa}\cdot\text{s}^n$)。根据该井井身结构并对照表 1 和表 2, 模拟平均环空返速为 0.8 m/s 时的冲洗效率, 新评价方法应利用内外筒序号 2 组合, 转速为 100 r/min (该返速下壁面剪切速率为 125.98 s^{-1} , 序号 2 组合模拟剪切速率能达到 125.03 s^{-1} ,

两者最为接近)。实验中药品与加量都相同, 三种评价方法的冲洗时间皆为 10 min , 实验数据见表 3。

从表 3 可以看出, 在相同冲洗时间下, 行业标准与旋转粘度计法对清水和复配冲洗液的冲洗效率区分度不大, 而且与实际胶结强度没有很好的正相关, 即冲洗效率较高而模拟界面胶结强度很差。润湿反转率也反映出清水和复配冲洗液对界面润湿反转能力的差异。

表 3 不同评价方法对冲洗液的评价结果对比

冲洗液类型	不同评价方法的第一界面冲洗效率/%			第一界面胶结强度/MPa		第一界面润湿反转率/%
	行业标准	旋转粘度计法	模拟评价方法	冲洗后钢柱	未粘附钻井液钢柱	模拟评价方法
清水	97.8	95.3	82.1	0.4	4.2	9.5
复配冲洗液	98.1	96.2	93.5	3.6	4.3	83.7

通过接触角测定仪对两种冲洗液进行评价, 清水在亲油玻片上的接触角为 70° , 而复配冲洗液则完全铺展开, 接触角只有 5° 。利用含油岩心接触角也可以验证新评价方法中界面胶结强度与润湿反转情况的一致性。将两块岩心在油基钻井液中浸泡相同时间, 然后分别用清水和复配冲洗液以 1 m/s 速度冲洗 10 min , 在冲洗后的岩心表面滴几滴清水, 观察岩心的润湿反转情况(见图 3)。

基钻井液, 并且能够同时得出冲洗液的冲洗效率和冲洗后的模拟固井界面胶结强度, 能够对冲洗液的冲洗效果做出评价以及对固井冲洗液施工设计做出优化。

(3) 该方法采用环空壁面与改进装置内筒壁面处剪切速率相等的原理, 通过改变外筒尺寸的技术手段, 在不改变转速的情况下增加了旋转粘度计的剪切速率范围, 保温装置避免了较长转动时间下温度对实验结果的影响。

参考文献:

[1] SY/T 5374-2000, 油气井注水泥前置液使用方法[S].
[2] 张明霞, 向兴金, 童志能, 等. 水泥浆前置液评价方法总论[J]. 钻采工艺, 2002, 25(6): 81-83.
[3] 王广雷, 吴迪, 姜增宝, 等. 固井冲洗效率评价方法探讨[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(2): 77-80.
[4] 黄逸仁. 适用于钻井液的罗伯逊-斯蒂夫模式[J]. 西南石油学院学报, 1982, (2): 16-28.
[5] 李克文, 沈平平. 原油与浆体流变学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994. 22-105.
[6] S. Lu, W. Foxenberg. Double-Emulsion Spacer Design for Highly Efficient Invert Emulsion[J]. SPE151604, 2012.
[7] G. Maserati, E. Daturi, A. Belloni et al. Nano-emulsions as Cement Spacer improve the Cleaning of Casing Bore during Cementing Operations [J]. SPE133033, 2010.
[8] Peter Osode, Msalli Otaibi, Khalid Bin Moqbil et al. Evaluation of Nonreactive Aqueous Spacer Fluids for Oil-based Mud Displacement in Open Hole Horizontal Wells[J]. SPE161914, 2012.
[9] Pedro Esteves Aranha et al. A Comprehensive Theoretical and Experimental Study on Fluid Displacement for Oilwell Cementing Operations [J]. SPE150276, 2012.
[10] Juan Carrasquilla, Dominique Guillot, Syed A. Ali et al. Microemulsion Technology for Synthetic-Based Mud Removal in Well Cementing Operations [J]. SPE156313, 2012.

(a) 清水冲洗后岩心润湿性 (b) 复配冲洗液冲洗后岩心润湿性

图 3 含油岩心在清水与复配冲洗液冲洗后的润湿情况对比

室内模拟评价方法通过测量界面胶结强度弥补了单纯的冲洗效率不能评价冲洗液对固井胶结界面的润湿反转情况的缺陷, 并且可同时得到冲洗液的冲洗效率、冲洗后的界面胶结强度和润湿反转率, 更能体现出对油基钻井液冲洗效果评价的适用性。

4 结论

(1) 根据剪切速率相等原理来改进冲洗液评价方法, 以剪切速率为切入点, 通过改变外筒尺寸来得到内筒表面不同的剪切速率值。结合室内实验与现场施工设计, 更加真实地反应了冲洗液对胶结界面的冲洗效果。

(2) 该方法操作简单, 适应于油基钻井液和水