

东海盆地大位移井固井工艺技术研究

何斌斌¹, 张军义¹, 黄佩², 韩婧¹, 曹太云², 潘高锋²

(1. 中石化华北石油工程有限公司技术服务公司, 河南 郑州 450042; 2. 中石化海洋石油工程有限公司上海特殊作业分公司, 上海 200137)

摘要: 东海盆地西湖凹陷为典型的低孔低渗储层, 地层压力系数求取困难, 导致压稳计算难度高, 增加了固井压稳准确计算的难度。同时受油基钻井液作业的影响, 加剧了固井高效顶替难度。通过优化浆柱结构设计、开发高效冲洗前置液和聚合物防窜水泥浆体系, 优选压稳防窜计算方法, 形成了东海大位移井固井工艺配套技术, 研究成果在东海进行了4井次的应用试验, 固井质量优良, 满足油气井后续开发需求。

关键词: 大位移井; 固井; 压稳防窜; 气窜; 东海盆地

中图分类号: TE256 **文献标志码:** A

Research on cementing technology of extended reach wells in the East China Sea Basin

HE Binbin¹, ZHANG Junyi¹, HUANG Pei², HAN Jing¹, CAO Taiyun², PAN Gaofeng²

(1. Technology Service Company of Sinopec Huabei Oilfield Service Corporation, Zhengzhou 450042, China;

2. Special Operations Branch of Sinopec Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: The Xihu Sag in the East China Sea Basin is a typical reservoir with low porosity and low permeability, and it is challenging to obtain the formation pressure coefficient, making it more difficult to calculate pressure stability and cementing pressure stability accurately. The difficulties of effective cement replacement have also become more challenging as a result of the oil-based drilling fluid operation. For the extended reach wells in the East China Sea, the cementing technology includes optimizing the design of the slurry column structure, efficient flushing of the ahead fluid, anti-gas channeling cement slurry with polymer materials, and calculation method of pressure stability and anti-channeling. Four wells in the East China Sea have used this cementing technology, and the cementing quality is excellent, meeting the requirements of oil and gas wells for subsequent development.

Key words: extended-reach well; well cementing; pressure stabilizing and anti-gas channeling; gas channeling; East China Sea Basin

东海盆地西湖凹陷的油气藏是典型的低孔低渗储层, 其储层流阻大, 地层压力求取难度高, 增加了固井压稳防窜难度^[1]。随着勘探开发的推进, 大位移井数量逐年增加, 部分井水平位移超过3 000 m, 受井身结构的影响, 套管居中难度高, 安全下入难度大, 裸眼段长度增加, 漏失风险高, 制约了固井质量的提高, 轻则导致固井质量差, 重则导致油气井开发过程环空带压, 严重影响了油气井寿命和产能建设^[2]。因此, 开展东海大位移井固井技术研究, 优选固井液体体系, 优化配套的固井工艺技术, 对于提高东海大位移井固井质量意义重大。

1 固井技术难点

(1) 水平位移大, 井斜大, 套管安全下入、居中难度高。东海大位移井水平位移在3 000 m左右,

井斜普遍为60°左右, 部分井井斜达到90°, 下套管过程受套管自重的影响, 斜井段、水平段套管易贴边, 致使套管下放摩阻大。套管下放到位后居中度难以达到67%, 受居中度低的影响, 固井顶替期间, 易出现窜流、扰流等, 影响环空泥浆的置换, 顶替效率难以达到理想要求。

(2) 油基钻井液对固井质量的影响。使用油基钻井液钻进, 固井期间套管壁、井壁难以被高效清

收稿日期: 2022-04-14; 改回日期: 2022-05-07。

第一作者简介: 何斌斌(1987—), 高级工程师, 目前主要从事石油天然气固井技术研究及现场服务工作。E-mail: hebinbin_petroileum@163.com。

基金项目: 中石化海洋石油工程有限公司科研项目“西湖凹陷油基钻井液环境下固井技术优化研究”(项目编号: KJ-2021-23)。

洗,滤饼难以清除,会降低水泥环界面胶结强度。且井壁岩石表面多呈亲油界面,与水泥浆无法有效兼容,制约固井二界面胶结质量^[3]。水泥浆与油基钻井液混合后易发生絮凝,抗压强度低。

(3)地层压力系数难以准确判断,影响压稳防窜措施的制定。受储层流阻大的影响,固井前难以获取准确的地层压力数据,固井压稳系数判断不准。若压稳系数过低,候凝期间地层流体侵入环空,形成微裂隙,导致固井质量不合格或是油气井环空带压,将影响油气井后续的安全生产。

(4)平湖组煤层发育,煤层承压能力弱,固井期间易发生漏失。东海西湖凹陷地层坍塌压力高,完钻时钻井液密度高,而平湖组煤层发育,其承压能力弱,漏塌压力安全窗口窄,固井期间漏失风险高。

2 固井工作液设计

2.1 高效冲洗前置液

高效的冲洗前置液对于提高固井质量和顶替效率具有重要意义,特别是油基钻井液作业井固井,前置液的冲洗效果更是直接关系顶替效率和界面胶结质量。为保障冲洗效率,东海大位移井固井冲洗液由“加重冲洗隔离液+高效冲洗液”组合而成,既将钻井液与水泥浆充分隔离,又实现对套管壁、井壁的高效冲洗。

加重冲洗隔离液由加重剂、悬浮稳定剂和表面

活性剂组成。悬浮稳定剂是一种高分子聚合物,溶于水后形成立体网状结构,可以充分分散加重材料,使加重材料保持良好的悬浮稳定性。同时,悬浮稳定剂可提高隔离液的黏度,降低隔离液滤失量。加重剂由不同粒径的惰性材料组成,既起到充填加重的作用,辅助压稳,又能在加重冲洗隔离液上返过程中撞击、冲刷井壁,提高清洁效率。表面活性剂是一种具有两亲性的非离子表面活性物质,亲油基团吸附于油相上,亲水基团伸向水相,改变井筒内的润湿性,降低界面张力,清除滤饼,使套管和井壁上的油污被逐渐剥离^[4],改善胶结质量^[5]。

为提高固井顶替效率和有效封隔,隔离液密度设计遵循 $\rho_{\text{钻井液}} \leq \rho_{\text{隔离液}} \leq \rho_{\text{水泥浆}}$ 的原则,形成密度级差,避免发生重力置换形成混浆。隔离液流变参数设计遵循动塑比 $(\frac{\tau_0}{\eta})_{\text{钻井液}} \leq (\frac{\tau_0}{\eta})_{\text{隔离液}} \leq (\frac{\tau_0}{\eta})_{\text{水泥浆}}$ 的原则^[6],逐级提高壁面切力有效驱替泥饼,实现“稠顶稀”。

针对东海固井,分别设计了密度为1.25、1.33、1.43、1.50、1.52、1.59、1.63 g/cm³的7种不同密度加重冲洗隔离液,满足东海不同地层压力条件的固井需要。设计上分别考虑了冲洗隔离液的密度、流变性能和相容性,在保障施工安全的基础上,提高顶替效率。加重冲洗隔离液室内实验评价数据见表1—表3。

表1 加重冲洗隔离液悬浮稳定性实验数据							g/cm ³
编号	原始密度	室温静止 48 h		93 ℃静止 2 h		93 ℃静止 5 h	
		上	下	上	下	上	下
1#	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
2#	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33
3#	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.42	1.43
4#	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.49	1.51
5#	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.51	1.53
6#	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.58	1.60
7#	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.62	1.64

注:以下加重冲洗隔离液实验配方编号同表1。

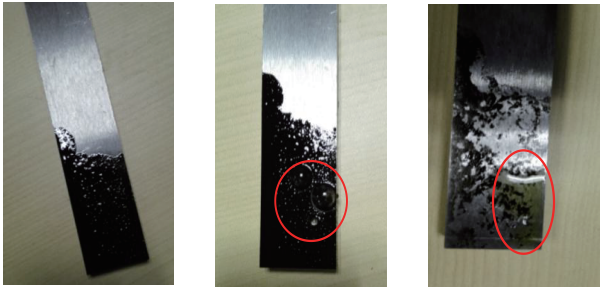
表2 加重冲洗隔离液流变性能实验数据						
编号	密度/(g·cm ⁻³)	流性指数	稠度系数/(Pa·s ⁿ)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	动塑比
1#	1.25	0.389 1	1.896 5	13	14.82	1.140
2#	1.33	0.373 5	2.189 6	13	15.84	1.219

续表 2 加重冲洗隔离液流变性能实验数据

编号	密度/(g·cm ⁻³)	流性指数	稠度系数/(Pa·s ⁿ)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	动塑比
3#	1.43	0.530 5	0.672 7	16	10.22	0.639
4#	1.50	0.525 1	0.792 5	18	11.75	0.653
5#	1.52	0.421 8	1.950 7	18	17.89	0.994
6#	1.59	0.507 0	1.233 7	24	16.86	0.703
7#	1.63	0.502 5	1.335 2	25	17.89	0.715

表 3 加重冲洗隔离液相容性实验数据

流体类型	实验温度/℃	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	流动度/cm
钻井液:水泥浆=3:1	93	68	21.46	20
钻井液:水泥浆=1:1	93	64	17.89	20
钻井液:水泥浆=1:3	93	59	14.31	20
钻井液:隔离液:水泥浆=1:2:1	93	56	12.78	20



a.浸有油基钻井液的钢条 b.高效冲洗液冲洗前 c.高效冲洗液冲洗后
图 1 高效冲洗液润湿性实验

据表 1—表 3 可知:加重冲洗隔离液在室温条件和 93℃条件下具有良好的悬浮稳定性、流变性和相容性。室温、93℃条件下分别静止 2 h、5 h,加重冲洗隔离液上、下密度差均小于 0.02 g/cm³。稠化实验测试表明,当钻井液:隔离液:水泥浆为 1:1:1 时,其稠化时间大于水泥浆稠化时间,满足施工要求。

2.2 高效冲洗液

高效的冲洗效果是保障油基钻井液条件下界面胶结质量的有效措施。设计的高效冲洗液由钻井水和表面活性剂组成。图 1 为高效冲洗液的润湿反转实验,在浸有油基钻井液的钢条上滴清水,水滴明显无法铺开,经高效冲洗液冲洗后,水滴快速铺开,表明经高效冲洗液冲洗后,浸有油基钻井液的钢条表面发生了润湿反转。

2.3 水泥浆体系设计

东海大位移井多采用一次上返裸眼全封固井

方式,其中上层套管鞋附近、油气层井段使用常规密度水泥浆,剩余裸眼井段采用低密度水泥浆充填封固。常规密度水泥浆选用聚合物防气窜体系,低密度水泥浆选用粉煤灰体系。

为满足东海大位移井后期作业需求,优选降失水剂、缓凝剂、膨胀剂、防窜剂及增韧剂,开发了性能优良的聚合物防气窜水泥浆体系。优选的降失水剂是一种 AMPS 类四元共聚物,适用温度区间宽,降滤失效果好。优选的缓凝剂是大温差缓凝剂的一种,缓凝效果明显,且大温差条件下顶部水泥石强度发展速度快,可满足不同密度的水泥浆稠化时间控制^[7]。优选的膨胀剂是晶格膨胀剂的一种,在水泥水化过程中形成无机多水混合物,补偿水泥浆水化过程体积收缩。优选的防窜剂可显著缩短水泥浆的静胶凝强度过渡时间,增加水泥浆的内部气侵阻力,实现防气窜效果^[8-9]。180 目和 500 目硅粉搭配混入水泥,大粒径硅粉有利于抑制水泥石长期强度衰退,小粒径硅粉比面积大,活性高,有利于提升水泥石早期抗压强度发展速度,且不同粒径硅粉搭配使用,有益于降低水泥石渗透率。

通过室内实验,确定了聚合物防气窜水泥浆体系配方:水泥+35% 硅粉+3%~5% 降失水剂+1%~2% 防窜剂+1% 增韧剂+0.5%~2% 膨胀剂+缓凝剂+水。体系具有失水低、稠化过渡时间短、静胶凝过渡时间短、强度发展快等特点,实验数据如表 4 所示。

表4 A井所用聚合物防气窜水泥浆综合性能参数

浆柱类型	密度/ (g·cm ⁻³)	流动度/ mm	稳定性/ (g·cm ⁻³)	失水量/ mL	游离液/ mL	初稠/ Bc	<i>P</i> _{24h} 强度/ MPa	稠化时间/ min	静胶凝过渡 时间/min
领浆	1.90	220	<0.02	28.0	0.0	17.5	20.6	386	18
过渡尾浆	1.90	220	<0.02	28.0	0.0	17.6	19.5	282	18
速凝尾浆	1.90	220	<0.02	28.0	0.0	17.8	21.8	238	16

3 固井配套工艺技术

3.1 浆柱结构优化

合理的浆柱结构设计,是固井质量的重要保障。出于压稳防漏和顶替效率的考虑,东海大位移井固井水泥浆以三凝浆柱结构为主,前置液体系设计了加重冲洗隔离液和高效冲洗液,固井结束后环空自上而下依次为钻井液、加重冲洗隔离液、冲洗液、首浆、充填浆、尾浆。首浆封固上层管鞋处的井段,尾浆封固油气层井段,其余裸眼井段粉煤灰水

泥浆充填。

对于钻进期间全烃值最大值不低于40%的大位移井,设计过渡尾浆。东海大位移井固井结束后的环空浆柱如图2所示。

增加过渡尾浆后,可显著增加速凝尾浆失重后的环空液柱压力,降低气窜风险。以A井为例,尾浆设计改为“速凝尾浆+过渡尾浆”的组合结构,与常规方法相比,当速凝尾浆失重后,该方法可增加环空液柱压力0.58 MPa,环空液柱压力当量密度增加0.015 g/cm³,压稳系数提高,防窜效果增强。

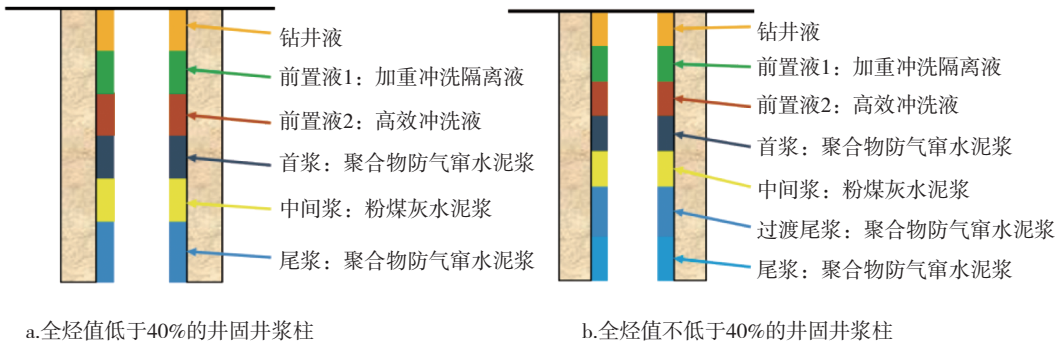


图2 东海大位移井固井环空浆柱结构

3.2 套管偏心控制

研究表明,当套管居中度不低于67%时^[10],有益于固井质量。而大位移井固井选择合适的套管扶正器,既可保障套管居中度,又有利于降低下套管摩阻。东海大位移井选择了支撑力强、启动力低的半钢扶正器,半钢扶正器本体上的螺旋形扶正模块,既能支撑套管,提高套管居中度,又能形成扰流效应,改变环空流体的流动方向,提高顶替效率^[11]。利用固井模拟校核软件优化扶正器安放方案,保障居中度不低于67%,具体安放方式设计为:浮鞋以上连续3根套管,每根套管安放1只扶正器,实现套管“抬头”,引导套管顺利入井;油气层、隔层井段每1根套管安放1只扶正器;剩余尾浆封固井段每2根

套管安放1只扶正器;上层套管鞋处每1根套管安放1只扶正器,其余井段每3~5根安放1只扶正器。

3.3 压稳防窜设计

压稳是固井成功的关键保障,东海大位移井受地层低孔渗储层流阻大的影响,准确求取地层压力系数的难度高,增加了压稳设计难度^[12]。选择合适的压稳防窜判断方法,指导固井环空浆柱结构设计,对提高固井质量意义重大。研究表明,气窜主要发生在固井候凝期间,随着环空水泥浆静胶凝强度的增强,水泥浆静液柱压力逐渐降低,压力损失增加,当环空静液柱压力小于地层压力时,发生气窜。利用防气窜固井分段设计方法^[13],明确水泥浆在静胶凝强度形成时的液柱压力损失值,确定候凝

期间的环空液柱压力值,与地层孔隙压力值对比,若两者比值大于1,可以压稳地层;若两者比值不大于1,则存在气窜风险。

水泥浆在静胶凝强度发展过程中,静胶凝强度会阻止液柱压力传递,导致液柱压力出现损失,液柱压力损失值计算方法表述为:

$$P_1 = \frac{P_{SGS} L}{250(D-d)} \quad (1)$$

式中, P_1 为水泥静胶凝强度导致的液柱压力损失值,MPa; P_{SGS} 为水泥静胶凝强度,Pa; L 为地层流体顶部尾浆柱长度,m; D 为井眼直径,mm; d 为套管外径,mm。

静胶凝强度形成后,环空液柱压力剩余值计算方法表述为:

$$P_2 = \sum \rho g L - P_1 \quad (2)$$

式中, P_2 为环空液柱压力剩余值,MPa; ρ 为环空流体的密度值, g/cm^3 ; L 为环空流体的垂直高度,m; g 为重力加速度常数,取0.00981。

通过地层压力预测、电测测压取样、参考邻井压力资料等方式获取地层压力系数,并确定地层压力,其表达式表述为:

$$P_3 = \rho_f g H \quad (3)$$

式中, ρ_f 为地层压力当量密度, g/cm^3 ; g 为重力加速度常数,取0.00981; H 为地层垂厚,m。

压稳系数 φ 计算可表述为:

$$\varphi = \frac{P_2}{P_3} \quad (4)$$

若 φ 大于1,表明可以压稳,气窜风险低;反之表明压稳不足,气窜风险高。

3.4 高效顶替技术

受油基钻井液及井身结构特点的影响,顶替效率对东海大位移井固井质量至关重要。经验数据表明:返速达到1.2 m/s时,接触时间大于10 min可以实现有效驱替。为进一步验证经验数据的准确性,确定东海大位移井固井顶替排量 and 合理设计量,以1.45 g/cm^3 的加重冲洗隔离液为例,利用六速黏度计法,评价了单独使用加重冲洗隔离液、高效冲洗液及两者配合使用3种不同组合的前置液冲洗3 min的冲洗效果,结果表明:单独使用加重冲洗隔离液时,冲洗3 min,冲洗效率为74%;单独使用高效冲洗液时,冲洗3 min,冲洗效率为83%,两者组合冲洗3 min,冲洗效率可达到90%以上(见图3)。

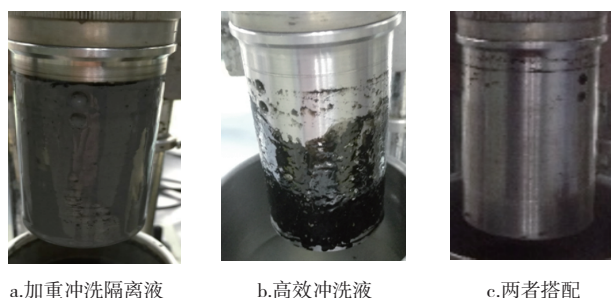


图3 冲洗效果评价实验

基于图3的实验结果,分别评价不同密度加重冲洗隔离液与高效冲洗液搭配使用时,不同转速条件下固定冲洗5 min的冲洗效果(见图4)和300 r/min的条件下冲洗效率随冲洗时间变化的情况(见图5)。

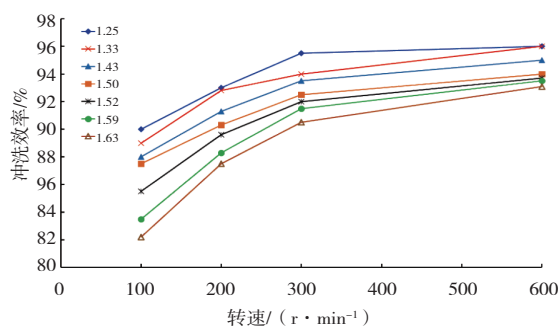


图4 冲洗效率与冲洗速率关系曲线

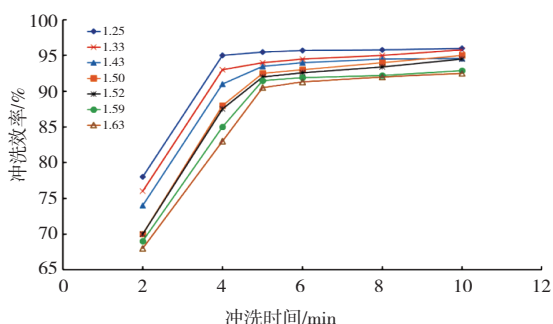


图5 冲洗效率与冲洗时间关系曲线

实验数据表明,当冲洗时间大于5 min时,可以实现较好的冲洗效果,设计的前置液与井壁的接触时间大于5 min时,有益于高效顶替。为实现固井期间的高效顶替,设计前置液接触时间不少于12~15 min。通过计算前置液临界紊流排量,确定前置液的注入量,前置液紊流环空临界排量计算方法如下^[14-15]:

$$\text{当 } \frac{D_c}{D_h} \leq 0.3 \text{ 时,}$$

$$Q_c = \frac{\pi(D_h^2 - D_c^2)}{4} \left\{ \frac{8^{n-1} \left[\frac{(3n+1)}{(4n)} \right]^n K Rec}{K \rho (D_h - D_c)^n} \right\}^{\frac{1}{1/(2-n)}} \quad (5)$$

当 $\frac{D_c}{D_h}>0.3$ 时,

$$Q_c=\frac{\pi(D_h^2-D_c^2)}{4}\left\{\frac{12^{n-1}\left[\frac{(2n+1)}{(3n)}\right]^n KRe_c}{K\rho(D_h-D_c)^n}\right\}^{\left[\frac{1}{(2-n)}\right]} \tag{6}$$

式中: D_c 为套管外径,m; D_h 为井眼平均井径,m; Q_c 为紊流临界排量, m^3/s ; ρ 为浆体密度, kg/m^3 ; n 为流性指数; K 为常数,取1。 Re_c 为临界紊流雷诺数,取 $Re_c=4\,150\sim 1\,150n$ 。

当前置液返出套管鞋时,顶替排量不小于加重冲洗隔离液的临界紊流排量,实现对油气显示井段的高效冲刷。

4 现场应用效果

在东海完成大位移井固井施工共计4井次,目的层、气水隔层井段均封固良好,固井声幅值小于10%,有效保障了产能建设。以A井为例,该井使用 $\varnothing 311\text{ mm}$ 钻头钻至5 020 m完钻,完钻水平位移

2 985 m,最大井斜 58° ,下入 $\varnothing 244.5\text{ mm}$ 套管固井,固井数据如表5所示,压稳计算如表6所示。该井通过优化浆柱结构设计、高效加重冲洗隔离液及压稳防漏设计,保障了固井“三压稳”,测井显示封固质量优良,关键层段固井质量如图6所示。

表5 东海A井固井关键数据

完钻井深	5 020.00 m
完钻垂深	3 878.12 m
井眼尺寸	311.2 mm
套管尺寸	244.5 mm
完钻井液密度	1.46 g/cm ³
预测最大地层孔隙压力系数	1.28 g/cm ³
最大全烃值	71.78%
过渡尾浆封固段长	100.00 m
速凝尾浆封固段长	502.00 m
尾浆失重后环空液柱压力	53.21 MPa
压稳当量密度	1.484 g/cm ³

表6 东海A井固井压稳计算数据

速凝尾浆失重时环空静液柱当量					
斜深/m	对应垂深/m	流体描述	液体相对密度/(g·cm ⁻³)	静液柱压力/MPa	当量密度/(g·cm ⁻³)
0.00	0.00	井口	1.46	0.00	1.460
2 105.00	1 784.61	首浆顶	1.90	24.54	1.402
2 605.00	2 163.94	中间浆顶	1.60	31.61	1.489
4 414.00	3 540.08	过渡尾浆顶	1.90	53.21	1.532
4 514.00	3 604.12	速凝尾浆顶	按150 Pa计算失重	54.40	1.539
4 614.00	3 662.12	油气显示顶	按150 Pa计算失重	54.96	1.530
5 020.00	3 878.12	井底	按150 Pa计算失重	57.05	1.499
过渡尾浆失重时环空静液柱当量					
斜深/m	对应垂深/m	流体描述	液体相对密度/(g·cm ⁻³)	静液柱压力/MPa	当量密度/(g·cm ⁻³)
0.00	0.00	井口	1.46	0.00	1.460
2 105.00	1 784.61	首浆顶	1.90	24.54	1.402
2 605.00	2 163.94	中间浆顶	1.60	31.61	1.489
4 414.00	3 540.08	过渡尾浆顶	按150 Pa计算失重	53.21	1.532
4 514.00	3 604.12	速凝尾浆顶	按150 Pa计算失重	53.83	1.522
4 614.00	3 662.12	油气显示顶	按150 Pa计算失重	54.39	1.514
5 020.00	3 878.12	井底	按150 Pa计算失重	56.47	1.484

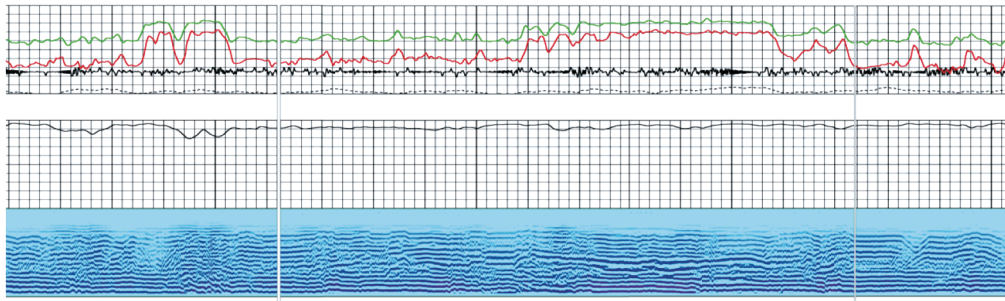


图6 东海A井关键层段固井质量

5 结论

(1)利用静胶凝强度法确定环空液柱压力剩余值,通过设计过渡尾浆,提高速凝尾浆失重后的环空液柱压力剩余值,提高了固井压稳系数,压稳防窜设计针对性更强,有效解决了东海低孔渗储层固井的气窜问题。

(2)开发的冲洗隔离液与高效冲洗液组成的前置液组合,兼具高效冲洗、润湿反转的效果,实现了对油基钻井液的高效驱替。通过优化前置液流变性能、设计段长,优选固井顶替排量,实现了大位移井固井期间的高效顶替,有效保障了固井质量。

(3)开发的聚合物防气窜水泥浆的失水不高于30 mL,静胶凝过渡时间在30 min以内,稠化过渡时间不超过10 min、24 h抗压强度不低于17 MPa,体系性能优良,经应用表明该体系防气窜效果良好,满足东海大位移井的固井需求。

参考文献:

- [1] 雷磊,李乾,黄佩,等.东海防气窜固井技术研究与应[J].石油工业技术监督,2021,37(3):55-59.
- [2] 王涛,和鹏飞,宫吉泽,等.东海深井超深井定向钻完井关键技术[J].石油钻采工艺,2020,42(5):578-582.
- [3] 童杰,李明,魏周胜,等.油基钻井液钻井的固井技术难点与对策分析[J].钻采工艺,2014,37(6):17-20.
- [4] 刘钰龙,刘小利,唐凯.厄瓜多尔 Parahuacu 油田低压高渗小间隙尾管固井技术[J].复杂油气藏,2021,14(2):94-99.
- [5] 欧红娟,李明,王崇榆,等.油基钻井液固井前置液技术研究进展[J].精细石油化工进展,2016,17(2):1-5,11.
- [6] 吴天乾,李明忠,蒋新立,等.鄂尔多斯杭锦旗区块低漏失压力井固井工艺技术[J].复杂油气藏,2018,11(4):69-73.
- [7] 田宝振,覃毅,高飞,等.ZG112深井低密度高强度韧性水泥浆固井技术[J].石油钻采工艺,2019,41(3):288-293.
- [8] 李望军,周成裕,廖易波,等.新型防气窜剂 DA34L 的室内评价及现场应用[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2015,17(4):80-84.
- [9] 朱海金,王恩合,王学成,等.水泥浆防窜性能实验评价及其应用[J].天然气工业,2013,33(11):79-85.
- [10] 董星亮.海洋钻井手册[M].北京:石油工业出版社,2011:429,434.
- [11] 徐璧华,夏爽,温达洋,等.旋流扶正器井眼清洁效率规律研究[J].钻采工艺,2017,40(6):15-18.
- [12] 宫吉泽,张海山,黄召,等.东海低孔渗储层固井压稳技术应用[J].石油化工应用,2018,37(2):27-31.
- [13] 周仕明,李根生,初永涛.防气窜固井分段设计方法[J].石油钻探技术,2013,41(5):52-55.
- [14] 国家能源局.固井设计规范:SY/T 5480-2016[S].北京:石油工业出版社,2016.
- [15] 范志坤,夏忠跃,冯雷,等.雷家碛井区固井漏失层分析及固井防漏工艺技术[J].复杂油气藏,2021,14(3):105-110.

(编辑 韩 枫)