

裂缝性地层承压防漏堵漏钻井液技术室内研究

王富华¹, 孙希腾¹, 丁万贵², 吴晓光³, 冯 力³, 徐延勇², 于婉秋³

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 中联煤层气能源有限公司, 北京 100000; 3. 中澳煤层气能源有限公司, 北京 100101)

摘要:裂缝性漏失是钻井施工中比较常见且危害较大的一种漏失类型。针对此技术难题,从分析裂缝性地层的漏失机理入手,提出了承压防漏堵漏技术对策。结合 LX 区块裂缝性地层的漏失特点,按照多元协同原则,基于平行缝和梯形缝漏失物理模型,分别利用传统的堵漏仪和新型实验装置进行了堵漏材料优选、承压浆悬浮稳定性和承压堵漏性能实验,形成了一套适合于常规地层和储层的可酸溶解堵的承压堵漏剂配方。室内评价结果表明,研发的承压堵漏剂具有较强的悬浮稳定性和封堵承压性能,有效承压值高达 28.0 MPa,能够有效封堵井下水力宽度不超过 2.0 mm 的裂缝,可满足井下完井承压堵漏技术要求,有望解决常规裂缝漏失技术难题。

关键词:井漏;裂缝;漏失压力;堵漏剂;地层承压能力;室内评价

中图分类号:TE25 **文献标志码:**A

Lab study on pressure-bearing antileakage and plugging drilling fluid technology in fractured formations

WANG Fuhua¹, SUN Xiteng¹, DING Wangui², WU Xiaoguang³, FENG Li³, XU Yanyong², YU Wanqiu³

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. China United Coalbed Methane Energy Co., Ltd., Beijing 100000, China; 3. China Australia Coalbed Methane Energy Co., Ltd., Beijing 100101, China)

Abstract: Fractured leakage is a common and harmful type of leakage in drilling operations. In response to this technical problem, starting from the analysis of the leakage mechanism of fractured formations, the technical measures for pressure-bearing leakage prevention and plugging are proposed. Combining the leakage characteristics of fractured formations in the LX Block, and by the principle of multiple synergies, based on the physical models of parallel fractures and trapezoidal fractures, the traditional plugging evaluating instrument and the new experimental device were used to carry out the experiments of the plugging material optimization, the pressure slurry suspension stability, and the pressure-bearing plugging performance. And then it was formed a set of acid-soluble pressure-bearing plugging agent formulas suitable for conventional formations and reservoirs. The lab evaluation results show that the developed pressure bearing sealing agents had strong suspension stability and sealing pressure-bearing capability, with an effective pressure-bearing value of up to 28.0 MPa, which could effectively seal fractures with a hydraulic width of less than 2.0 mm. It may meet the technical requirements of pressure bearing sealing of downhole completions, which is expected to solve the technical problem of general fractured leakage.

Key words: lost circulation; fracture; lost circulation pressure; plugging agent; formation pressure-bearing capability; lab evaluation

随着我国油气资源勘探开发区域逐渐扩展到开发难度高、地质特征复杂的区块,钻遇的裂缝性地层越来越多,由于裂缝性地层井壁承压能力低,钻井过程中钻井液漏失严重。国内外学者在地层漏失机理研究及堵漏技术方面已取得了大量成果^[1-11],对于裂缝性地层漏失机理及提高地层承压能力进行了大量研究。本文在此基础上,针对LX区块裂缝性地层漏失严重、地层承压能力低的情况,分析了

裂缝漏失机理,提出了承压防漏堵漏技术对策,结合LX区块裂缝性漏失特点,进行了堵漏材料优选、承压浆悬浮稳定性和承压堵漏性能实验,形成了一套承压堵漏剂配方。为裂缝性易漏失地层扩大钻井

收稿日期:2019-09-19;改回日期:2019-11-08。

第一作者简介:王富华(1968—),副教授,主要从事钻井液与油气层保护方面的教学和科研工作。E-mail:zgswfh@126.com。

液安全密度窗口、提高地层承压能力提供技术支持。

1 裂缝性地层漏失机理与防漏堵漏技术对策

1.1 裂缝性地层漏失机理

LX区块属于低压易漏失地层,地层压力系数在0.7~1.0之间,地层压力一般小于20 MPa,完钻井深在1 900~2 000 m之间。LX区块已钻井的井漏事故情况表明,表层漏失主要发生在延长组黄土层井段,由于地层胶结疏松、承压能力低、存在天然裂缝或诱导裂缝,一旦排量稍大,就会发生漏失,漏失通道迅速被漏失钻井液冲蚀变大,进而很快演变成失返性漏失。其它层位的漏失主要发生在刘家沟组和石千峰组交界面、石千峰组以及石盒子组,漏失的主要原因也是地层承压能力低,地层存在天然裂缝或诱导裂缝。

地层被钻开后,原来稳定的地应力状态被破坏,井周应力将沿井壁重新分布;同时,钻井液与地层热交换将引起井壁温度发生变化,进而在井壁产生不可忽略的温变附加应力^[12-13]。

对于LX区块,最易发生漏失的地层往往有以下两种情况:

(1)黄土岩地层裸眼井段最低孔隙压力位置:黄土岩本身存在大量的微裂隙,地层压力有一定程度释放,地层孔隙压力降低,从而岩石骨架会承受更大的上覆岩层压力,加剧裂缝的产生,形成诱导性裂缝,出现漏失。压力释放越大的位置,漏失风险越高,如延长组黄土层井段的表层漏失。

(2)岩性发生较大变化的交界面位置:漏失往往最易发生在不同岩性的交界面处,交界面处地层岩石强度特性发生较大的变化,砂岩的抗拉强度相对于泥岩出现较大幅度的降低,导致地层更容易出现拉伸破坏,从而发生漏失。如刘家沟组和石千峰组交界面、石千峰组以及石盒子组的漏失。

1.2 裂缝性地层承压防漏堵漏技术对策

1.2.1 防漏堵漏压力条件

为了避免产生钻井液的漏失,漏失产生的三个必要条件——漏失通道、正压差和固相颗粒尺寸中,至少要使其中的一个条件不能得到满足。又因为泥浆中的固相颗粒尺寸基本不能改变,漏失通道中的天然裂缝也不能改变,而人为因素导致的压裂

裂缝是由于正压差作用导致,因此可对正压差这一漏失必要条件进行改变,从而避免漏失的产生。此外,虽然漏失通道基本不可改变,但是可以通过向漏失通道中注入堵漏剂来填充漏失通道的方法进行堵漏。在井眼中,要想防止钻井液漏失进入地层,在只改变正压差这一条件的前提下,需要使井眼中钻井液在各种压力下要达到平衡,即避免出现正压差。在漏失过程中,在漏失通道内存在以下压力平衡关系^[14-15]:

$$P_p + P_z = P_h + \Delta P_a \quad (1)$$

式中: P_p 代表地层孔隙压力,MPa; P_z 代表钻井液进入地层裂缝的流动阻力,MPa; P_h 代表钻井液静液柱压力,MPa; ΔP_a 代表井内钻井液环空压耗,MPa。

在给定的井眼深度和各种参数条件下,上式中地层孔隙压力、钻井液静液柱压力、井内钻井液环空压耗都为定值,因而若想平衡掉正压差,只能靠钻井液进入地层裂缝流动阻力来平衡,只有这样才能使地层压力平衡,避免出现井漏的发生。

1.2.2 提高地层承压能力防漏堵漏的方法

由上述分析可知,避免漏失、提高地层的承压能力可采用对地层裂缝进行填充堵塞和利用工作液进入地层裂缝的阻力来实现。增大钻井液进入裂缝的阻力方法有很多,包括增大钻井液的黏度、减小漏失通道的宽度、形成致密并且承压能力强的泥饼等^[16]。综合而言,其它条件的改变不如形成致密并且承压能力强的泥饼具有可操作性。因此,本文采用堵漏剂堵塞漏失裂缝、并在堵墙表面形成致密并且承压能力强的封堵膜相结合的方法来提高地层的承压能力,原理如图1所示。

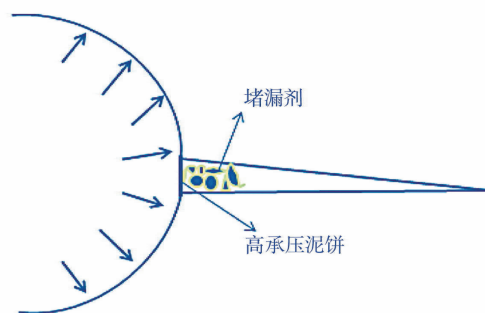


图1 提高裂缝承压能力原理

首先对裂缝进行架桥堵漏,形成一定厚度的堵墙,在堵墙表面形成致密性好、具有承压能力高的封堵膜。堵漏剂可选用不同类型的架桥颗粒进行组合架桥,堵塞漏失的裂缝通道;然后利用承压封堵材料形成性能良好、承压能力高的封堵膜,阻止液

相的侵入、进一步提高地层承压能力。

2 承压防漏堵漏钻井液体系的研制与评价

2.1 承压堵漏剂配方确定

2.1.1 承压堵漏材料类型

桥接承压堵漏中的堵漏材料要起到密封和支撑裂缝的作用。各种承压堵漏材料作用机理如下：实验优选的堵漏材料在压差作用下对漏失通道产

生高强度堵塞，其中的HTK和BK类颗粒刚性大,强度高,在漏失通道中形成桥塞;纤维材料具有一定的柔性,可对裂缝通道产生分割变为小孔隙,纤维材料和片状材料本身也可以变形产生软封堵;弹性膨胀颗粒进一步镶嵌桥塞堵墙空隙，随着时间延长,体积膨胀,进一步挤压漏失空间;硅膜承压剂在井壁及堵漏材料形成的堵墙上形成致密封闭膜,阻止液相渗滤,从而起到良好的封闭、承压作用。通过室内实验优选的部分堵漏材料见表1。

表1 优选材料基本性质

材料		性质	备注
刚性材料	BK	密度:2.67 g/cm ³ 酸溶率:98.5% 熔点:>200℃ 莫氏硬度:3 抗压强度:27 MPa 吸水膨胀性:弱	具有较高的抗高温抗高压的能力，同时又具有很高的酸溶率,既可用于非储层也可用于储层的堵漏。作为填充材料
弹性颗粒材料	XJ	易发生弹性形变 弹性系数:0.45 抗高温:120℃ 破碎压力:50 MPa 密度:1.17 g/cm ³ 均匀分散于钻井液	耐酸碱
纤维材料	ZXW	柔软易于变形与缠绕	易获取,成本低
承压材料	MSC-3H		自主研发的新型承压剂

MSC-3H是用过硫酸铵作为引发剂，由两种单体合成的冻胶承压堵漏剂,含有刚性的环形结构同时也有柔性的碳链结构,材料具有柔韧性、足够的强度和耐热性,膨胀倍数可达50~100倍,膨胀时间持续6 h以上,具有持续膨胀的效果。

用架桥堵漏的方法一般架桥颗粒都为无机架桥颗粒，相互之间架桥堵塞后不能很好地完全填充,而且无机架桥颗粒不具有膨胀性,所起作用较为单一。将冻胶堵漏剂混入复合架桥颗粒中,采用无机颗粒与有机颗粒架桥相结合的方法使填充作用更明显。可以在裂缝处形成致密、牢固、承压能力

强的封堵层。

刚性颗粒材料选用天然刚性材料BK(全酸溶)、HTK颗粒以及高强度延展性铝合金颗粒堵漏剂GYD（全酸溶），弹性颗粒材料选用工业废料XJ颗粒、蛭石和吸水体膨承压颗粒TP(全酸溶),纤维材料选用海泡石、工业废纤维ZXW和锯末,片状材料选用云母片,承压封堵材料选用钻固井硅膜承压剂MSC-3H(全酸溶)。

2.1.2 承压堵漏材料粒径与加量

根据Howard和Scott的SAN-2工程分布理论确定了各种材料的粒径级配(见表2)。

表2 桥接材料粒径级配数据

裂缝宽度/ mm	不同粒径材料所占体积比/%								
	4目	5目	6目	10目	20目	40目	60目	80目	100目
1	0	0	0	0	4.6	41.5	25.7	15.9	12.2
2	0	0	0	3.5	25.2	31.1	19.3	11.9	9.1
3	0	0	2.2	15.9	26.4	21.3	16.3	10.1	7.7
4	0	2.8	5.1	15.0	24.8	20.1	15.4	9.5	7.3
5	4.0	4.7	4.8	14.1	23.3	18.9	14.5	8.9	6.8

根据FMI测井可知,LX区块实际地层的裂缝应在毫米级别,因此初步以2 mm裂缝宽度设计粒径级配,对表1中各类型堵漏材料粒径比例进行调整,最终确定各种类型堵漏材料级配为:3%HTK(6~10目)+1%BK(或GYD,6~10目)+0.1%TP(1~3 mm)+0.9%TP(≤ 1 mm)(为方便起见,命名该组以颗粒为主的堵漏剂代号为5%KL);0.8%XJ (40~60目)+0.2%XJ

(80目)+0.5%锯末(60~80目)+0.3%蛭石(20~40目)+0.2%蛭石(40~60目)+0.5%海泡石+0.5%ZXW+1.2%云母片(20~40目)+0.8%云母片(40~60目)(同样地,命名该组以纤维材料为主的堵漏剂代号为5%XW)。

2.2 承压复合堵漏剂悬浮稳定性评价

进行悬浮稳定性实验,观察上述承压复合堵漏剂在热滚前后的悬浮稳定性,实验结果见表3和表4。

表3 热滚前后定性观察实验数据

实验组数	实验方法	定性观察
第一组	80℃/16h 热滚前,基浆加入 5%KL+5%XW+1%MSC-3H	可悬浮稳定
第二组	基浆 80℃/16h 热滚后,加入 5%KL+5%XW+1%MSC-3H	可悬浮稳定
第三组	基浆加入 5%KL+5%XW+1%MSC-3H 后一起热滚 80℃/16h	可悬浮稳定

表4 悬浮稳定性定量评价实验数据

序号	沉降前密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	沉降时间/h	上层密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	下层密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
1	1.230	2	1.250	1.250
2	1.220	4	1.245	1.250
3	1.230	6	1.235	1.240
4	1.230	8	1.245	1.250
5	1.210	10	1.233	1.235

由表3实验结果可知,基浆无论是热滚前后加入承压复合堵漏剂,还是加入承压复合堵漏剂一起热滚,都具有较好的悬浮稳定性。

由表4数据可知,上下层密度基本相同,随时间延长,下层密度比上层密度略高,但差距极小,基浆在10 h仍能有效地稳定悬浮承压复合堵漏剂;沉降实验前测定的密度小于放置一段时间后上下层测定的密度,这是由于承压浆中气泡较多,所以密度

偏低,而放置一段时间后气泡消退,测得密度就变高。

2.3 承压堵漏钻井液体系性能评价

2.3.1 静态承压堵漏评价实验

针对优选的承压复合堵漏剂,采用QD-2堵漏仪(实验压差0~10 MPa),对1~5 mm平行裂缝漏失模型评价承压复合堵漏剂不同加量下的承压堵漏效果,实验结果如表5所示。

表5 QD-2静态承压堵漏评价实验数据

不同加量的承压复合堵漏剂	(不同宽度平行裂缝模型的总漏失量/mL)/(承压值/MPa)					备注
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	
5%KL+5%XW+1%MSC-3H	40/8.0	401.5/8.0	680/7.0	625/7.0	680/6.5	承压堵漏实验浆总量为4 000 mL
3.75%KL+3.75%XW+1%MSC-3H	20/8.0	65/8.0	75/8.0	180/7.0	全漏失/0.5	
2.5%KL+2.5%XW+1%MSC-3H	80/8.0	120/8.0	600/7.5	全漏失/1.5	全漏失/0	

由表5数据可知,随裂缝宽度增大,承压堵漏浆漏失总量均增多;随堵漏剂加量减少,最大封堵裂缝宽度也变小;对于1~4 mm平行裂缝,3.75%KL+3.75%XW+1%MSC-3H加量下漏失总量最小,承压堵漏效果最好,这可能是因为该承压堵漏剂存在最适宜产生封堵的浓度,浓度增大或减小不利于形成有效架桥;对于1~3 mm平行裂缝,三种加量下有效

承压堵漏的承压值均高于7.0 MPa,完全满足井下承压堵漏的要求。

2.3.2 动态承压堵漏评价实验

由QD-2静态承压堵漏评价实验可知,在5%KL+5%XW+1%MSC-3H 加量下,承压浆对1~4 mm裂缝都能产生良好封堵,承压值不低于7.0 MPa。为了进一步模拟井下堵漏实际工况,选择5%KL+5%

XW+1%MSC-3H 的承压堵漏浆,利用LH-2A智能型钻井液高温高压多功能动态评价实验仪(实验压差0~40 MPa)进行平行缝和梯形缝的动态承压堵漏对比实验,根据LX区块地层特征,设定温度为85℃,测试时,从低压到高压进行压力循环测试,记录总滤失量,结果如表6所示。

表6 LH-2A平行缝和梯形缝的动态承压堵漏对比实验数据

项目	平行缝宽度/mm			梯形缝宽度(大底边/小底边)/mm			备注
	1	2	3	2/1	4/2	6/3	
总漏失量/mL	82.5	472.0	全漏失	313.5	419.0	全漏失	承压堵漏实验浆总量为1 600 mL
最大承压值/MPa	28.6	28.0	19.8	28.0	28.5	2.3	

由表6数据可知,5%KL+5%XW+1%MSC-3H 的承压堵漏浆对1 mm和2 mm的两种平行缝、2 mm/1 mm和4 mm/2 mm两种梯形缝都能产生良好封堵,承压值均高达28.0 MPa;而在3 mm平行缝和6 mm/3 mm梯形缝全部漏失,不能产生有效封堵,但平行缝漏失压差(19.78 MPa)明显高于梯形缝的漏失压差(2.32 MPa)。由此可见,该承压复合堵漏剂能够有效封堵水力学宽度不超过2 mm的裂缝,可望解决常规裂缝漏失技术难题。

3 结论

(1)LX区块表层以及刘家沟和石千峰组界面、石千峰组、石盒子组漏失的主要原因为地层承压能力低、存在天然裂缝或诱导裂缝,其防漏堵漏机制为采用架桥封堵漏失通道与堵墙表面形成高承压能力封堵膜相结合的方式来提高井壁承压能力。

(2)通过室内实验,确定了承压复合堵漏剂的组成(组分类型、含量及粒径分布)和加量,形成了可酸溶解堵的承压堵漏浆配方,评价结果表明,该堵漏浆流变性能较好,具有良好的悬浮稳定性。

(3)承压堵漏浆静态评价实验表明,研制的承压复合堵漏剂有效承压值均高于7.0 MPa,完全满足井下完井承压堵漏的要求。

(4)承压堵漏浆动态评价实验表明,研制的承压复合堵漏剂对1 mm和2 mm的平行缝、2 mm/1 mm和4 mm/2 mm梯形缝均能产生良好封堵,动态承压值高达28.0 MPa,亦即能够有效封堵井下水力学宽度不超过2 mm的裂缝,可望解决常规裂缝漏失技术难题。

参考文献:

[1] TEHRANI A,FRIEDHEIM J,CAMERON J,et al.Designing fluids for wellbore strengthening-Is it an art[C]. AADE-07-NTCE-75.
[2] NAYBERG T M.Laboratory study of lost circulation materials for use in both oil-based and water-based drilling

muds[J]. Spe Drilling Engineering,1987,2(03):229-236.
[3] PILEHVARI A A,NYSHADHAM V R. Effect of material type and size distribution on performance of loss/seepage control material[C]. Society of Petroleum Engineers,2002.
[4] WANG Hong,TOWLER B F,SOLIMAN M Y,et al. Wellbore strengthening without propping fractures:analysis for strengthening a wellbore by sealing fractures alone [C].International Petroleum Technology Conference,2008.
[5] LOEPPKE G E,GLOWKA D A,WRIGHT E K. Design and evaluation of lost-circulation materials for severe environments[J]. Journal of Petroleum Technology,1990,42(3): 328-337.
[6] 孙金声,苏义脑,罗平亚,等. 超低渗透钻井液提高地层承压能力机理研究[J]. 钻井液与完井液,2005,22(5): 1-3.
[7] 刘金华,王治法,常连玉,等. 复合堵漏剂 DL-1 封堵裂缝的室内研究[J]. 钻井液与完井液,2008,25(1):50-52.
[8] 吕开河,邱正松,魏慧明,等. 自适应防漏堵漏钻井液技术研究[J]. 石油学报,2008,29(5):757-760,765.
[9] 刘金华,刘四海,陈小锋,等. 承压堵漏技术研究及其应用[J]. 断块油气田,2011,18(1):116-118,125.
[10] 王禹,黄达全,解文,等. 板南储气库井承压堵漏技术 [J]. 钻井液与完井液,2013,30(3):47-49.
[11] 王悦坚. 塔河油田恶性漏失堵漏与大幅度提高地层承压技术[J]. 钻井液与完井液,2013,30(4):33-36.
[12] 李嗣贵,邓金根,蔚宝华,等. 高温井地层破裂压力计算技术[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(2):5669-5673.
[13] 蔚宝华,卢晓峰,王炳印,等. 高温井地层温度变化对井壁稳定性影响规律研究 [J]. 钻井液与完井液,2004,21(6):15-18.
[14] 李大奇,康毅力,刘修善,等. 基于漏失机理的碳酸盐岩地层漏失压力模型 [J]. 石油学报,2011,32(5): 900-904.
[15] 康毅力,许成元,唐龙,等. 构筑井周坚韧屏障:井漏控制理论与方法[J].石油勘探与开发,2014,41(4):473-479.
[16] 王贵,蒲晓林. 提高地层承压能力的钻井液堵漏作用机理[J]. 石油学报,2010,31(6):1009-1012.

(编辑 韩 枫)