加蓬G区块破碎地层井壁失稳机制与钻井液技术对策

张广垠[1],金军斌[2],夏柏如[1]

1. 中国地质大学工程技术学院,北京 100083
2. 中国石化石油工程技术研究院,北京 100101

摘要　加蓬G区块是中石化海外重点勘探开发区块,LPC和ANG复杂地层钻井施工中出现了严重的井壁失稳问题。通过破碎地层的泥页岩岩心表观特征分析、泥页岩钻屑清水浸泡试验、泥页岩黏土矿物分析和泥页岩滚动回收试验得出,以伊/蒙混层和伊利石为主的黏土矿物组分和微裂隙发育特征是加蓬G区块破碎地层井壁失稳的外在物质条件;钻井液滤液沿裂隙和微裂隙进入地层深部,使黏土矿物水化膨胀,使井壁失去平衡,是导致坍塌掉块的内在原因。制定了钻井液密度应力防塌、屏蔽封堵防塌、优质钻井液体系配方等综合防塌技术措施,在加蓬G区块进行了现场试验,G-9井和G-10井2口井LPC和ANG地层的平均井径扩大率分别降低到11.6%和12.1%,井身质量较邻井有显著的提高,取得了良好的井壁稳定效果。

关键词　井壁失稳;破碎地层;钻井液;加蓬G区块

中图分类号　TE254　　**文献标志码**　A　　**doi**　10.3981/j.issn.1000-7857.2014.13.009

Wellbore Instability Mechanism of Broken Formations and Drilling Fluid Countermeasures in G Block, Gabon

ZHANG Guangyin[1], JIN Junbin[2], XIA Bairu[1]

1. School of Engineering & Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China

Abstract　The block in Gabon is an important exploration and development block of Sinopec overseas. Wellbore instability existed in LPC and ANG formations during drilling operations. Through the analysis of shale core apparent characteristics in broken formations, shale cuttings water immersion test, shale and shale clay mineral analysis, and rolling recycling test, it is shown that the Illite / Smectite mixed layers, Illite clay mineral components and micro-fissures are the material conditions of the instability mechanism of broken formation of the G block Gabon. On the other hand, mud filtrates along fractures and fissures deep into the formation to cause hydration swelling of clay minerals and borehole loss of balance, which is the inherent mechanism leading to the collapse of blocks. Anti-sloughing drilling fluid density stress shielding comprehensive technical measures and drilling fluid system and quality recipes were developed. Field tests were conducted in G-9 and G-10 wells in Gabon. The LPC and ANG formation borehole calipers were reduced to 11.6% and 12.1%, respectively, as compared to the neighboring wells. The wellbore quality has been improved significantly, and good wellbore stability has been achieved.

Keywords　wellbore instability; broken formations; drilling fluid; G block in Gabon

加蓬G区块位于加蓬海岸盆地北加蓬次盆中部,距加蓬共和国西部第二大城市让蒂尔港东约45 km处,面积1240 km^2。中国石化国际石油勘探开发有限公司已经在该区块钻探了G-1、G-2等10口探井,在PC组、ANG组地层均钻获工业油流。采用SPE标准初步估算,该区块C1级地质储量为614×10^4 t,加上SM、GG、NT的储量共861×10^4 t,圈闭资源量为13.94×10^4 t,具有广阔的勘探开发前景[1]。但该区块PC组、ANG组地层极为破碎,G-1、G-2、G-3、G-4、G-6等井的钻井

收稿日期:2014-01-20;修回日期:2014-02-27

作者简介:张广垠,高级工程师,研究方向为海外欠平衡钻井、控制压力钻井、油气层保护技术,电子信箱:gyzhang.sipc@sinopec.com

引用格式:张广垠,金军斌,夏柏如. 加蓬G区块破碎地层井壁失稳机制与钻井液技术对策[J]. 科技导报, 2014, 32(13): 53-57.

施工中均存在严重的井壁失稳问题,导致多口井出现“大肚子”井段,严重影响了井身质量,使测井和下套管施工困难,延长了建井周期、增加了钻井成本。

为提高井身质量,缩短建井周期,前期钻井施工过程中尝试了很多工程技术措施,均收效甚微。本研究针对井壁失稳机制,利用物理化学方法,通过岩性物性试验分析,提出相应的钻井液技术对策,并在G-9与G-10两口井现场应用,收到较好效果,为G区块后续钻井施工提供一套可行的技术方案与措施。

1 地质概况

加蓬G区块钻遇的地层自上而下依次为第四系、第三系、上白垩统的PG组、PC组和ANG组等多套地层。第三系主要分布于该区块的西南部,地层比较齐全,属于滨浅海相沉积,以泥岩为主夹细砂岩和粉细砂岩。PG组地层的岩性主要为灰色、灰白色粗砂岩、细砂岩夹灰色粉砂质泥岩,总厚度400~900 m。该地层的储集性能较好,是河流相的陆相碎屑岩。PC组地层为碎屑岩沉积,厚度600~1100 m,根据砂岩和泥岩的集中段划分为UPC段和LPC段。UPC段地层岩性为块状砂岩与泥岩略等厚互层,砂岩以细砂岩为主,砂泥岩比为45%~60%,属于三角洲前缘沉积环境;LPC段地层岩性为大套泥岩夹薄层砂岩,属于滨浅海沉积环境。ANG组地层厚度320~1000 m,为一套深灰色、灰黑色的泥岩夹灰色、灰白色的粉细砂岩,属于浅海—大陆架沉积环境。

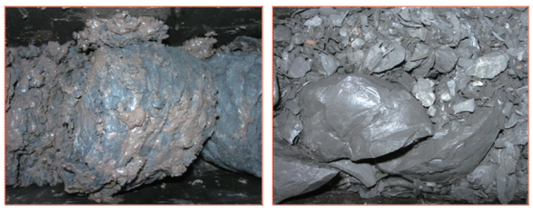
加蓬G区块钻探的主要目的层为上白垩统ANG组、LPC段和UPC段地层。ANG组和LPC井段垮塌掉块扩径,测井资料显示G-1、G-2、G-6三口井ANG和LPC地层(三开)平均井径扩大率分别达到21.6%、24.2%和25.3%,出现多处“大肚子”井段。

2 井壁失稳机制分析

室内从泥页岩岩心表观特征分析、钻屑浸泡试验、黏土矿物分析和破碎泥页岩滚动回收试验等方面分析和研究了加蓬G区块井壁失稳机制[2]。

2.1 泥页岩岩心表观特征分析

图1是G-6井1919 m处岩心用清水清洗前、后的照片,取心钻进过程中岩心的周围都是经过钻井液浸泡的,岩心表面观察存在很多的微裂隙,出心后虽然较为破碎,但是还具有一定的形状,岩心用清水漂洗后迅速完全分散,失去了原有的形状。



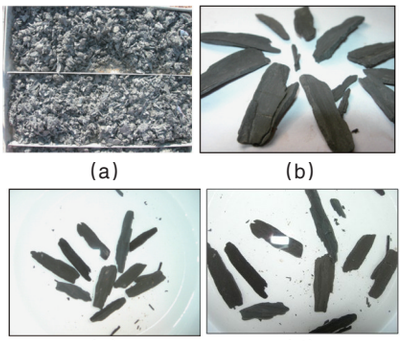
(a) 出心后 (b) 水洗后

图1 1919 m岩心照片

Fig. 1 1919 m drilling core of Well G-6

2.2 泥页岩钻屑清水浸泡试验

室内取G-6井井深1578~1582 m深灰色泥岩钻屑做清水浸泡试验(图2)。图2(a)为(钻屑录井)钻屑照片,图2(b)为挑选出的钻屑照片,图2(c)、(d)分别为同一井深清水开始浸泡、浸泡24 h的照片。可以看出,刚清洗后的钻屑(或剥落掉块)大多呈片状、具有一定的弧度和层理裂缝。钻屑(或剥落掉快)用清水浸泡48 h后几乎没有发生变化,说明钻屑分散到一定程度后,即使再用清水浸泡也不会再行分散,在较长的时间内保持一定的大小和形状,未发生细分散现象。



(a) (b) (c) (d)

图2 1578~1582 m钻屑照片

Fig. 2 1578~1582 m drilling cuttings of Well G-6

2.3 泥页岩黏土矿物分析

选取G-6井一定井深的泥岩钻屑,进行全岩矿物及黏土矿物X射线衍射分析,结果见表1。

表1 G-6井全岩矿物及黏土矿物X-射线衍射分析结果

Table 1 Well G-6 X-ray diffraction analysis of whole-rock mineral and clay mineral

样号	井深/m	全岩矿物含量/%						黏土矿物含量/%				S%
		石英	方解石	斜长石	钾长石	白云石	黏土总量	Kao	Ch	I	I/S	
1	1583~1586	31		6	1		62	13	17	35	35	40
2	1757~1760	35		8	1		56	12	13	25	50	45
3	1850~1858	33	8	7	2	2	48	12	12	24	53	48
4	1915~1920	29	11	12	1	2	45	11	11	21	57	55

从表1可知,黏土总量为45%~62%,其中黏土矿物以伊/蒙混层和伊利石为主,两者合计达70%以上。随着井深的增加,伊/蒙混层增高,且混层比也增大,而伊利石、绿泥石、高岭石随之降低。蒙脱石是产生吸水膨胀的基础物质,伊利石遇水产生分散,从而造成该地层易水化分散、剥落掉块。

2.4　泥页岩滚动回收试验

室内取G-6井一定井深的泥页岩岩心做滚动回收试验,结果见表2。分析数据可知,第1次滚动回收率R_1普遍较低,大约在46.23%~57.56%之间,第2次滚动回收率R_2相对较高,大约在44.47%~56.80%之间,第2次滚动回收率与第1次滚动回收率差值很小,R_2/R_1在0.9614~0.9868,由此说明,加蓬G区块泥岩遇水后迅速分散,当分散到一定程度后,水化分散的能力迅速减小。

表2　G-6井岩屑滚动回收试验结果

Table 2　Well G-6 drilling cutting rolling recovery experiment

井深/m	R_1/%	R_2/%	R_2/R_1
1583~1586	46.23	44.47	0.9619
1757~1760	53.84	52.90	0.9825
1850~1858	57.56	56.80	0.9868
1915~1920	50.48	48.53	0.9614

2.5　井壁失稳机制分析

1）加蓬G区块易垮塌地层黏土矿物以伊/蒙混层和伊利石为主,且混层比高,属易水化分散、剥落掉块地层。且伊/蒙混层矿物水化膨胀不均匀,在正压差钻井的情况下钻井液失水会沿裂隙和微裂隙进入地层,当钻井液滤液沿地层微裂隙侵入到地层深部时,蒙脱石将吸水膨胀,随着泥页岩水化膨胀的进行,地层将产生强大的膨胀压,井壁失去平衡,导致坍塌掉块[3~5]。

2）钻井液如控制不当将难以防止破碎地层的井壁坍塌,尤其是封堵防塌能力和泥饼质量直接关系到破碎地层井壁稳定的成败。

3）不合理的大排量冲刷井壁、长时间定点冲孔、过快的起下钻速度和钻具与井壁的机械碰撞也是导致井壁垮塌掉块的重要因素。

3　井壁稳定技术对策

3.1　主要技术思路

1）优化地层三压力剖面,综合考虑地层孔隙压力和坍塌压力,选择合理的钻井液密度,提供可靠的钻井液液柱压力,力求达到控压钻井,实现钻井液密度应力防塌[6,7]。

2）采用"屏蔽封堵"防塌技术封堵微裂隙、提高地层的完整性。通过对纤维状架桥粒子、填充粒子、可变形粒子以及复合暂堵粒子优配组合,在微裂隙发育的泥页岩井壁形成类似于橡皮套的屏蔽层,在正液柱压力作用下通过屏蔽层达到护壁的作用。该屏蔽层渗透率低,具有一定强度,一方面阻止钻井液滤液进入地层,另一方面通过屏蔽层来支撑已失去稳定性的硬脆性泥页岩地层[4,8]。

3）选择强抑制性钻井液体系,调整优良的钻井液性能,配合相应的钻井工程技术措施(降低排量、减小井壁冲刷、控制起下钻速度等)实现综合防塌[4,9]。

3.2　井壁失稳技术对策

1）确定合理的钻井液密度实现应力防塌。

通过岩石力学实验和对4口井测井资料的计算处理,在加蓬G区块建立了精确的地层压力数据。根据LPC和ANG地层的孔隙压力、坍塌压力、破裂压力数据,考虑井壁失稳的影响,钻进LPC和ANG地层期间的钻井液密度分别控制在1.27~1.52 g/cm^{3}和1.65~1.72 g/cm^3,并随井深的增加逐步调整(表3)。

表3　复杂地层压力数据及推荐的钻井液密度

Table 3　Complex formation pore pressure data and recommended drilling fluid density

地层	孔隙压力/(g·cm^{-3})	坍塌压力/(g·cm^{-3})	破裂压力/(g·cm^{-3})	钻井液推荐密度/(g·cm^{-3})
LPC	1.18~1.45	1.20~1.50	1.95~2.00	1.27~1.52
ANG	1.45~1.68	1.50~1.56	1.95~2.10	1.52~1.75

2）优化屏蔽封堵技术提高破碎地层的完整性。

室内通过优化QS-2、PB-1和FT-1等材料加量来提高对地层的屏蔽封堵效果。根据加蓬G区块破碎地层的微裂隙大小,室内选择1.90 mm石英砂堆积压实后模拟该地层。利用黏附系数测定仪,将石英砂放入不锈钢纱网中,倒入测试浆液,并加压3.5 MPa,在压力作用下,堵漏材料与砂体形成一个具有一定强度的类似于橡皮套的整体,在过平衡液柱压力作用下起着封堵地层的目的,试验结果见表4。

从表4可看出,3%超细碳酸钙(QS-2)+2%屏蔽封堵剂(PB-1)+3%磺化沥青(FT-1)配方可以封堵1.90 mm直径的砂体,4 mm封堵层致密且有一定强度,砂体与封固层黏结成一个整体,可以较好地封堵裂缝性地层。

表4 屏蔽封堵试验结果

Table 4 Shield blocking test results

QS-2/%	PB-1/%	FT-1/%	砂床底流/mL	封堵层厚度/mm	砂床封堵层描述
3	1	1	35	5.0	砂床表面封隔层较致密,有一定强度;砂体与封隔层粘为一体
3	2	3	16	4.0	封隔层厚4 mm,封隔层致密,砂体与封隔层粘为一体
3	3	5	10	3.5	封隔层厚3.5 mm,封隔层很致密,砂体与封隔层粘为一体

3)优选强抑制性钻井液体系配方。

(1)钻井液体系配方的选择。根据加蓬G区块UPC和ANG地层特点,通过大量的室内试验,优选的钾基聚合醇防塌钻井液体系和基础配方为:3%膨润土+0.2%纯碱+0.2%聚丙烯酸钾+0.3%低黏CMC+1%铵盐+3%高温滤失剂+3%磺化沥青+2%聚合醇+3%腐植酸钾+2.0%润滑剂+3%超细碳酸钙+2%屏蔽封堵剂+2%油层保护剂。配方中以聚丙烯酸钾提供K^+,实现体系的化学防塌;以聚合醇、磺化沥青和腐植酸钾为理化防塌主剂;以封堵防塌配方提高破碎地层的完整性。

(2)泥页岩滚动回收试验。采用G区块G-6井钻屑在室内做滚动回收试验,由表5可见,钾基聚合醇防塌钻井液配方中,随着大分子包被抑制剂、防塌主剂和屏蔽封堵剂的加入,泥页岩滚动回收率大幅度提高,滚动回收率由52.8%提高到98.8%。推荐的钻井液体系配方具有很高的滚动回收率,达到98.8%。

(3)钻井液加重试验。由于加蓬G区块地层压力较高,推荐使用的最高钻井液密度超过1.75 g/cm^3,需要对钻井液配方进行加重试验,试验结果见表6[5]。

表5 泥页岩滚动回收试验结果

Table 5 Rolling recovery experiment results of shale

配方	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	API失水/mL	滚动回收率/%	
					泥浆6 h	清水6 h
1#	12	4	8.0	24.8	52.8	26.4
2#	27	23	4.5	6.4	85.6	60.0
3#	31	25	5.0	4.6	94.6	74.6
4#	37	24	13	3.8	98.8	78.4

注:1#:3.0%坂土基浆;2#:1#+0.2%聚丙烯酸钾+3.0%高温滤失剂+0.5%低黏CMC +1.0%铵盐;3#:2#+3%高温滤失剂+2%聚合醇+3%腐植酸钾;4#:3#+3%磺化沥青+3%超细碳酸钙+2%屏蔽封堵剂。

表6 钻井液加重试验结果

Table 6 Test results for increasing density of the drilling fluid

密度/(g·cm^{-3})	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	API失水/mL	黏附系数
1.20	24	18	6	4.2	0.05
1.40	27	20	7	3.8	0.05
1.60	33	25	8	4.0	0.07
1.80	41	32	9	4.4	0.08
2.00	55	45	10	4.8	0.12

注:加重试验使用的钻井液配方为:3%膨润土+0.2%纯碱+0.2%聚丙烯酸钾+0.3%低黏CMC+1%铵盐+3%高温滤失剂+3%磺化沥青+2%聚合醇+3%腐植酸钾+2.0%润滑剂+3%超细碳酸钙+2%屏蔽封堵剂+2%油层保护剂,使用重晶石加重。

由表6可看出,随着钻井液密度的增加,钻井液的表观黏度和塑性黏度有增加的趋势,但动切力变化不大;失水有先降后增的微弱趋势,钻井液的润滑性逐渐降低,即使钻井液密度加重到1.8 g/cm^{3}仍保持较好的流变性,完全能够满足加蓬G区块最高1.75 g/cm^{3}的地层压力要求。

4 现场应用

G-9井和G-10井是加蓬G区块两口定向探井。设计井深分别是2649.73 m和2701.98 m,完钻井斜角分别是38.27°和51.7°。针对加蓬G区块井壁失稳破碎地层特点,两口井均采用了钾基聚合醇防塌钻井液体系和相应的屏蔽防塌技术措施,取得了良好的井壁稳定效果。以G-9井为例说明钻井液和防塌技术措施的现场应用情况。

4.1 现场维护处理主要技术措施

1)钻井液体系转换时,按照钾基聚合醇防塌钻井液配方一次性加入足量聚合物及防塌剂,调整钻井液性能达到要求后方可钻进。

2)根据钻井进尺、地层压力剖面和随钻地层压力检测结

果,及时上调钻井液密度,防止复杂地层的应力垮塌。

3）钻井中定期补充屏蔽防塌剂、超细碳酸钙和磺化沥青,保持屏蔽封堵防塌配方中各种材料的有效含量。

4）聚合物配制成0.5%～1.0%的胶液以细水长流的形式加入,并保证足够的含量,提高钻井液的抑制能力;通过铵盐、稀释剂胶液控制粘切;利用高温滤失防塌剂、腐植酸钾,以改善泥饼质量;聚合醇的加入要配合一定的消泡剂。

5）在补充新浆时,确保钻井液中聚合物防塌剂的含量,适当补充润滑剂,以利于防塌、防卡。

6）LPC和ANG井段全部为增斜或稳斜井段,液体润滑剂含量必须达到3%～5%,必要时加入固体润滑剂。每趟钻或短程起下钻前用稠浆(大于80 s)清扫井底,保持井眼畅通。

7）破碎复杂地层钻进期间,适当降低排量减小井壁冲刷、控制起下钻速度降低激动压力等,杜绝工程操作对井壁稳定的影响。

8）钻完LPC和ANG地层后,进行短起下钻、补充部分润滑剂、充分循环钻井液,加入足量润滑剂后封闭斜井段,确保测井和下油层套管顺利。

4.2　现场应用效果

1）钻井液防塌抑制性较好、井身质量良好。从G-9井和G-10井三开测井数据分析可知,LPC和ANG井段(三开)除个别点出现一定程度的扩径外,没有出现明显的“大肚子”井段,井径质量控制良好,保证了后续作业的顺利进行。G-9井和G-10井三开平均井径扩大率分别控制在11.6%和12.1%。井身质量比G-1井、G-2井和G-6井有明显的提高(表7),达到了预期的井壁稳定效果。

表7　G区块6口井井径数据对比

Table 7　Well caliper data comparison of 6 wells

井号	最大井径/mm	平均井径/mm	平均井径扩大率/%
G-1	381.2	262.7	21.6
G-2	393.7	268.3	24.2
G-3	406.4	270.6	25.3
G-6	368.3	255.7	18.4
G-9	360.1	241.1	11.6
G-10	365.8	242.1	12.1

2）钻井液性能稳定、施工顺利,从未因钻井液问题发生严重的井下事故。从G-9井的现场跟踪情况分析,LPC和ANG复杂井段共用钻头6只,起下钻、短程起下钻和通井26次,除个别井段短起出现轻微遇阻外,其他井段施工均安全顺利,再未因钻井液和井壁失稳问题引起井下复杂与事故,钻井液施工顺利,较好地满足了钻井施工要求。

5　结论

1）以伊/蒙混层和伊利石为主的黏土矿物组分和微裂隙发育是加蓬G区块破碎地层井壁失稳外在物质条件;钻井液滤液沿裂隙和微裂隙进入地层深部,使黏土矿物水化膨胀,使井壁失去平衡,是导致坍塌掉块的内在机理。

2）G-9井、G-10井的现场应用表明,LPC和ANG复杂地层(三开)的平均井径扩大率分别为11.6%和12.1%,井身质量较邻井有显著的提高,取得了良好的井壁稳定效果。

3）钾铵基聚合醇防塌钻井液体系配合应力防塌、屏蔽封堵防塌等技术措施,较好地解决了加蓬G区块破碎地层的井壁失稳问题,施工中钻井液性能稳定,维护处理简单,是适合加蓬G区块复杂地层的成功钻井液体系。

4）通过对控制井壁失稳钻井液技术的研究和应用,有效解决了G区块井壁失稳的难题,减少和避免了井壁垮塌所造成的卡钻等复杂事故。

参考文献(References)

[1] 金军斌, 宋明全, 鲍洪志, 等. 加蓬G4-188区块钻井液技术难点与对策[J]. 石油探技术, 2010, 38(5): 101-105.
Jin Junbin, Song Mingquan, Bao Hongzhi, et al. Gabon block G4-188 drilling fluid technology difficulties and countermeasures[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(5): 101-105.

[2] 蔚宝华, 闫传梁, 邓金根, 等. 锦州25-1油田井壁稳定问题[J]. 科技导报, 2013, 31(14): 41-45.
Yu Baohua, Yan Chuanliang, Deng Jingen, et al. Wellbore stability of Jinzhou 25-1 oil field [J]. Science & Technology Review, 2013, 31(14): 41-45.

[3] 宋明全, 金军斌, 刘贵传, 等. 塔河油田三叠系石炭系井眼失稳机理及控制技术[J]. 钻井液与完井液, 2002, 19(6): 15-19.
Song Mingquan, Jin Junbin, Liu Guichuan, et al. Wellbore instability and control technologies in the triassic system and carboniferous system in Tahe Oilfield[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2002, 19(6): 15-19.

[4] 石秉忠, 金军斌. 复合金属离子聚磺混油钻井液体系的研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2000, 28(5): 35-36.
Shi Bingzhong, Jin Junbin. Study and applications of complexmetallic iron polysulfide drilling fluid system[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2000, 28(5): 35-36.

[5] 孙清华, 邓金根, 闫传梁, 等. 费尔干纳盆地井壁失稳机理研究[J]. 钻采工艺, 2013, 36(5): 9-12.
Sun Qinghua, Deng Jingen, Yan Chuanliang, et al. Study of borehole instability mechanism in fergana Basin[J]. Dilling & Production Tecnology, 2013, 36(5): 9-12.

[6] 陈志学, 冯晓炜, 崔龙连, 等. 致密砂岩气藏钻完井关键技术研究进展[J]. 科技导报, 2013, 31(32): 74-79.
Chen Zhixue, Feng Xiaowei, Cui Longlian, et al. Advances in the key technologies of drilling and completion for tight sand-stone gas eservoirs [J]. Science & Technology Review, 2013, 31(32): 74-79.

[7] 邓金根, 林海, 胡连波, 等. Kingfisher区块过断层地应力变化规律及井壁稳定性[J]. 科技导报, 2013, 31(23): 53-56.
Deng Jingen, Lin Hai, Hu Lianbo, et al. Variations of in-situ stress and wellbore stability for Kingfisher block through the fault[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(23): 53-56.

[8] 金军斌, 徐江, 张玉宁. 新型硅酸盐无渗透钻井液的研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(2): 48-52.
Jin Junbin, Xu Jiang, Zhang Yuning. Study and application of a new silicate non-permeable drilling fluid[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(2): 48-52.

[9] 曹园, 蔚宝华, 邓金根, 等. 砂岩地层井壁稳定性分析[J]. 科技导报, 2014, 32(2): 34-36.
Cao Yuan, Yu Baohua, Deng Jingen, et al. Wellbore stability of sandstone formation[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(2): 34-36.

(责任编辑　刘志远)