

文章编号: 1001-1986(2019)02-0200-07

硅质页岩岩粉侵入钻井液体系中泥饼性能研究

莫定强^{1,2}, 孙平贺^{1,2,3}, 赵斌魁^{1,2}, 王靖源^{1,2}, 张绍和^{1,2}, 曹 函^{1,2,3}

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 2. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083; 3. 美国亚利桑那州立大学, 坦佩 85282)

摘要: 钻井液在页岩钻探中对维护孔壁稳定十分重要, 其滤失形成的泥饼对保护储层同样有着举足轻重的作用。为了研究页岩岩粉侵入低固相钻井液中对泥饼基本性能的影响, 选取湘西北硅质页岩岩粉为研究对象, 通过正交试验设计并对结果进行了极差分析和方差分析。研究表明: 岩粉的含量是影响泥饼厚度的主要因素; 影响泥饼韧度的主要因素为滚动时间以及岩粉的粒径; 质量分数为 6% 的 200 目岩粉在滚动 6 h 后形成的泥饼最薄; 150 目的岩粉在质量分数为 6% 时滚动 12 h 后形成泥饼的韧度最大; 级配为(200+100)目时, 质量分数为 2% 的岩粉滚动 24 h 后形成泥饼最薄; 级配为(200+150)目时, 质量分数为 4% 的岩粉在滚动 12 h 后形成泥饼韧度最大。研究结论对钻井液现场的固相控制有积极意义。

关键词: 湘西北; 页岩气; 正交设计; 钻井液; 泥饼

中图分类号: TE132 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.02.031



Properties of mud cake associated with silica shale powder intrusion into drilling fluid

MO Dingqiang^{1,2}, SUN Pinghe^{1,2,3}, ZHAO Binkui^{1,2}, WANG Jingyuan^{1,2}, ZHANG Shaohu^{1,2}, CAO Han^{1,2,3}

(1. School of Geosciences and Information Physics, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction and Geoenvironmental Monitoring of the Ministry of Education, Changsha 410083, China; 3. Arizona State University, Tempe 85282, USA)

Abstract: Drilling fluid is very important for maintaining the stability of the hole wall in shale drilling. The mud cake formed by the fluid loss also plays a decisive role in protecting the reservoir. In order to study the influence of shale rock powder intrusion into low-solid-phase drilling fluids on the basic properties of mud cakes, the paper selects the siliceous shale powders in northwestern Hunan as the research object, and designs orthogonal experiments. In addition, the test results are analyzed using variance and range, which show that the content of rock powder is the main factor affecting the thickness of the cake. Besides, the main factors influencing the toughness of the cake are rolling time and the powder gradation. The mass fraction of 6% of the 200 mesh rock powder forms the thinnest mud cake after the rolling 6 hours. When the rock powder with a particle size of 150 mesh has a mass fraction of 6%, the toughness of the mud cake formed after rolling for 12 hours are the maximum. For the rock powder with a gradation of (200+100) mesh, the rock powder with 2% mass fraction forms the thinnest mud after rolling for 24 hours. When the gradation is (200+150) mesh, the rock powder with 4% mass fraction forms the greatest toughness of mud cake after rolling for 12 hours. The conclusion of the study has positive significance for the solid-phase control of the drilling fluid.

Keywords: northwest Hunan; shale gas; orthogonal design; drilling fluid; mud cake

收稿日期: 2018-05-12

基金项目: 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2018zzts690); 国家自然科学基金项目(41602372); 国土资源部复杂条件钻采技术重点实验室开放项目(DET201612)

Foundation item: Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University(2018zzts690); National Natural Science Foundation of China(41602372); The Fund of Ministry of Land and Resources Key Laboratory of Drilling Technology in Complex Conditions(DET201612)

第一作者简介: 莫定强, 1993 年生, 男, 四川宜宾人, 硕士研究生, 从事钻井液技术研究. E-mail: dingqiangMo@163.com

通信作者: 孙平贺, 1982 年生, 男, 吉林松原人, 副教授、硕士生导师, 从事非开挖、矿产地质及非常规能源深部钻进技术的教学与科研工作. E-mail: pinghesun@csu.edu.cn

引用格式: 莫定强, 孙平贺, 赵斌魁, 等. 硅质页岩岩粉侵入钻井液体系中泥饼性能研究[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(2): 200–206.

MO Dingqiang, SUN Pinghe, ZHAO Binkui, et al. Properties of mud cake associated with silica shale powder intrusion into drilling fluid in northwest Hunan[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(2): 200–206.

钻井液在页岩气开发过程中主要起维护孔壁、润滑、防卡、保护储层以及井眼清洁的作用^[1-2]。在页岩钻探中,由于钻井液与地层流体间存在正压差,在渗透性地层中钻井液便会渗入地层,大于孔喉半径的固相颗粒部分停留在井壁形成泥饼^[3]。泥饼在压差作用下被压实,而泥饼的渗透率远小于地层的渗透率,故泥饼对裸眼井壁起到稳定和保护作用^[4-5]。泥饼不但阻止了固相颗粒继续侵入也减少了钻井液滤液侵入地层,实现了对储层的保护^[6-7]。泥饼质量好坏的评价指标主要是泥饼强度、厚度、韧度等参数。泥饼质量将直接影响钻井效益^[8-9],而影响泥饼性能的主要因素有钻井液成分、地层孔隙度、加重材料、压差、地层渗透率以及岩粉等^[10-13]。页岩气勘探中,由于钻头不断地切削破碎岩石使岩粉侵入到配制的钻井液体系中,固控设备虽能一定程度清除钻井液中的岩粉,但不能完全将其去除^[14]。前人就钻屑对泥饼性能影响展开了部分研究,但以硅质页岩岩粉为研究对象开展岩粉对泥饼性能影响的研究很少。因此,为了揭示硅质页岩粉对泥饼性能的影响规律,笔者通过正交试验的方法,对湘西北不同粒径

硅质页岩展开了室内实验。

1 实验材料

实验样品采用湖南常德页岩,经XRD分析该页岩为硅质页岩。该区下寒武统牛蹄塘组以黑色页岩、炭质页岩、黑色硅质页岩为主,属碎屑岩深水陆棚或半深海-深海沉积,分布广泛、埋深较大、沉积厚度大、有机质丰度高,是上扬子板块一套主力生烃层系。

借鉴前人对页岩钻井液配方的研究成果^[15-17],结合湘西北硅质页岩特点,在室内做了相关实验,确立了以植物胶、膨润土、水、羧甲基纤维素、低荧光特效防塌护壁降失水剂为主的低固相钻井液配方。钻井液主要材料配比和配方基本性能如表1所示。

将不同目数的页岩岩粉加入低固相钻井液中以模拟页岩岩粉侵入低固相钻井液体系,页岩的目数有100目(150 μm),150目(106 μm),200目(75 μm)3个水平(后文叙述中采用目表达)。不同目数的页岩岩粉如图1所示。

表1 钻井液配方及其性能
Table 1 Formulation and performance of drilling fluid

水/mL	膨润土 质量/g	植物胶 质量/g	羧甲基 纤维素/g	低荧光降失水 剂/g	表观黏度/ (mPa·s)	塑性黏度/ (mPa·s)	滤失量/ mL
1 000	30	5	3.5	3	18.1	13	12.6

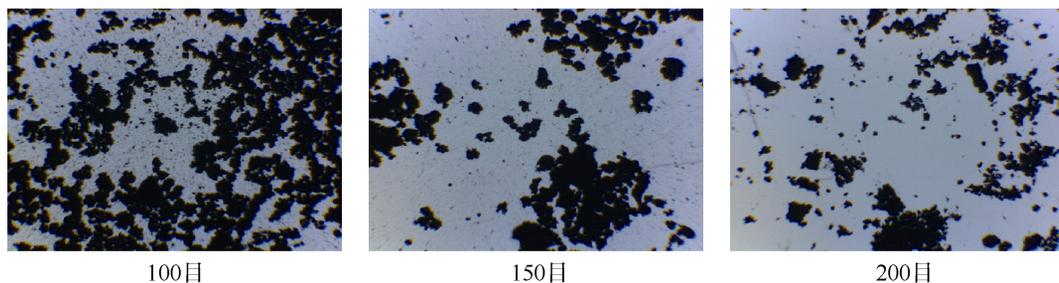


图1 页岩岩粉(放大400倍)

Fig.1 Shale rock powder(magnified 400 times)

2 实验方法

本次试验测试不同页岩粒径(级配)在不同质量分数和不同滚动时间条件下对泥饼性能的影响,属于多因素测试。正交试验设计是研究多因素水平的一种试验设计方法,它以概率论、数理统计以及实践经验作为基础,利用标准化正交试验表安排试验方案,对结果进行计算分析从而迅速找到优化方案。它从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,故能以较少的试验次数,较快地获取主要因素,

从而找到满意的方案。

根据试验情况,本次正交试验方案设计为2个三因素三水平试验。第1个试验方案为:页岩粒径、岩粉质量分数、滚动时间三因素三水平。第2个试验方案为:页岩级配、岩粉质量分数、滚动时间三因素三水平。页岩钻采过程中固控设备的筛网一般小于100目,且要求过筛后钻井液中固相颗粒质量分数一般不超过6%。故粒径设定为100目,150目,200目;岩粉质量分数设定为2%,4%,6%。滚动时间根据行业现有经验(6h的整数倍)设定为6h,

12 h, 24 h。2 个试验方案中均不考虑因素之间相互作用, 根据正交表的选取原则选择 $L_9(3^4)$ 正交表。因素对照试验表见表 2。

表 2 试验因素水平对照表
Table 2 Factor level comparison

水平	粒径(级配)/目	质量分数/%	滚动时间/h	备注
1	200	6	6	
2	150	4	12	方案1
3	100	2	24	
1	200+150	6	6	方案2, 试验
2	200+100	4	12	因素选用级
3	150+100	2	24	配

根据表 2 的因素水平对照表以及标准正交表选取原则, 将本实验的试验因素和水平进行排布, 结果如表 3 所示。

表 3 正交试验方案设计
Table 3 Orthogonal experimental design

试验号	粒径(级配)/目	质量分数/%	滚动时间/h	备注
1	200	6	6	
2	200	4	12	
3	200	2	24	
4	150	6	12	
5	150	4	24	方案1
6	150	2	6	
7	100	6	24	
8	100	4	6	
9	100	2	12	
10	200+150	6	6	
11	200+150	4	12	
12	200+150	2	24	
13	200+100	6	12	方案2, 试
14	200+100	4	24	验因素选
15	200+100	2	6	用级配
16	150+100	6	24	
17	150+100	4	6	
18	150+100	2	12	

实验时按照表 3 所示的试验设计向低固相钻井液中加入页岩岩粉, 搅拌均匀后装入陈化釜中并将其放入滚子炉中滚动。滚子炉设置温度为 25°C , 转速为 50 r/min 。滚动时间达到预设时间后测量侵入岩粉的低固相钻井液的 pH 值以及滤失量, 并利用失水仪制成泥饼, 随后用泥饼厚度韧度自动测量仪

测量泥饼的厚度、韧度以及强度。

3 实验结果与讨论

3.1 正交试验结果

泥饼结构可根据其强度和密实度不同分为泥饼虚厚和泥饼真厚, 虚厚和真厚的和为总厚^[18]。将制作好的泥饼放在 ZN-1L 厚度韧度自动测量仪下, 按照相关实验操作规范, 测量泥饼在水和水杯总质量为 140 g 、 160 g 、 180 g 、 200 g 、 220 g 、 240 g 、 260 g 、 280 g 、 300 g 、 320 g 条件下对应的厚度值。仪器根据测量数据并结合内部程序生成曲线, 将生成的曲线结合公式计算得到泥饼的强度和韧度。

$$K = \frac{b_1 w_2 - b_2 w_1}{w_2 - w_1} \quad (1)$$

$$\tan \theta = \frac{b_1 - b_2}{w_2 - w_1} \quad (2)$$

式中 K 是仪器生成曲线的重要依据; w_1 、 w_2 为作用在泥饼上水和水杯的质量, 本次实验中取 $w_1=140\text{ g}$, $w_2=200\text{ g}$; b_1 为泥饼在 140 g 下对应的厚度值, 此时的泥饼厚度为虚厚; b_2 为泥饼在 200 g 下对应的厚度值, 此时的泥饼厚度为真厚; $\tan \theta$ 为泥饼韧度, $\tan^{-1} \theta$ 为泥饼强度。

钻井液滚动完成后, 用 pH 计测量各实验号的 pH 值, 随后用六联失水仪测量钻井液的滤失量, 滤失完成后取出泥饼, 用泥饼厚度韧度自动测量仪测量泥饼的虚厚、真厚以及总厚, 并结合式(1)和式(2)计算每组正交实验中泥饼的 K 值、强度、韧度。测量和计算结果见表 4。

3.2 极差计算

一般用极差分析和方差分析 2 种方法分析正交试验设计方案计算结果。极差反映一组数据中两个极端数之间的差异情况, 即一组数据的离散程度, 只需要进行少量的计算便可得到各因素对试验指标的影响, 故先用极差计算方法找到各因素对试验结果影响大小情况, 极差计算公式:

$$m_i = k_i / n, \quad n=3 \quad (3)$$

$$R = m_{i\max} - m_{i\min} \quad (4)$$

式中 k_i 指第 i 个相同试验因素下(粒径、质量分数、滚动时间)所对应的试验指标之和, 如试验因素为粒径时, k_1 指的是粒径为 200 目(方案 1)的 3 次指标之和, 以此类推; m_i 为 k_i 对应的实验指标和的平均值; $m_{i\max}$ 为同因素对应的指标和的平均值的最大值; $m_{i\min}$ 为同因素对应的实验指标和的平均值的最小值; R 为极差。

表 4 实验结果
Table 4 Experimental results

试验号	pH 值	滤失量/mL	虚厚/mm	真厚/mm	总厚/mm	K 值	韧度	强度
1	8.84	10.10	0.53	0.36	0.89	0.93	0.002 8	357.14
2	8.91	9.36	0.70	0.63	1.33	0.86	0.001 2	833.33
3	8.89	10.50	0.70	0.63	1.33	0.86	0.001 2	833.33
4	9.08	10.02	0.90	0.57	1.47	1.67	0.005 5	181.82
5	8.82	9.48	0.61	0.55	1.16	0.75	0.001 0	1 000.00
6	8.95	8.80	0.65	0.57	1.22	0.84	0.001 3	769.23
7	8.75	7.49	0.58	0.53	1.11	0.70	0.000 8	1 250.00
8	8.90	9.20	0.97	0.85	1.82	1.25	0.002 0	500.00
9	8.81	9.15	0.55	0.39	0.94	0.92	0.002 7	370.37
10	8.84	9.49	0.65	0.54	1.19	0.91	0.001 8	555.56
11	9.02	8.98	0.51	0.37	0.88	0.84	0.002 3	434.78
12	9.08	9.47	0.57	0.52	1.09	0.69	0.000 8	1 250.00
13	9.03	9.28	0.32	0.28	0.60	0.41	0.000 7	1 428.57
14	8.92	8.50	0.48	0.43	0.91	0.60	0.000 8	1 250.00
15	8.97	10.07	0.44	0.39	0.83	0.56	0.000 8	1 250.00
16	8.86	9.45	0.48	0.42	0.90	0.62	0.001 0	1 000.00
17	8.99	9.50	0.32	0.27	0.59	0.44	0.000 8	1 250.00
18	9.14	9.78	0.70	0.63	1.33	0.86	0.001 2	833.33

各因素列的极差 R 表示该因素在其取值范围内试验指标变化的幅度, R 越大表明该因素对实验结果影响越大。以表 4 中的泥饼总厚结果作为实验指标, 对各因素进行极差分析, 计算 k_i 、 m_i 以及极差 R , 计算结果列于表 5。

由表 5 可知, 方案 1 中极差 R 大小为, 岩粉质量分数 > 滚动时间 > 岩粉粒径, 根据极差的性质可知, 影响泥饼厚度的主要因素为岩粉的质量分数, 其次为滚动时间和岩粉粒径。方案 1 中极差结果表明, 对于方案 1 中的正交试验而言, 岩粉质量分数是影响泥饼总厚的主要因素。方案 2 中可知, 极差 R 从大到小依次是岩粉质量分数、级配、滚动时间, 即对于方案 2 而言, 岩粉质量分数是影响泥饼总厚的主要因素。

对泥饼韧度进行极差分析, 其分析方法与泥饼总厚极差分析方法相同, 计算结果如表 6 所示。根据表 6

可知, 方案 1 中泥饼韧度的极差 R 大小, 为滚动时间 > 岩粉质量分数 > 粒径; 方案 2 中泥饼韧度的极差 R 大小, 为级配 > 滚动时间 > 质量分数。同理以泥饼的真厚、强度为实验结果进行极差分析。方案 1 中的泥饼强度的极差结果为, 滚动时间 > 岩粉质量分数 > 粒径; 方案 2 中泥饼强度的极差结果为, 岩粉级配 > 滚动时间 > 质量分数。方案 1 中泥饼真厚的极差结果大小为, 岩粉质量分数 > 滚动时间 > 粒径; 方案 2 中泥饼真厚的极差结果大小为, 岩粉质量分数 > 级配 > 滚动时间。

对于泥饼而言厚度越薄、韧度越好、密度越大, 其质量越好。以此为参考标准并结合优选配方的原则, 对于泥饼厚度而言选择每一种因素下指标和最小值, 对于泥饼韧度和强度而言选择每一种因素下指标和最大值从而得到最优组合。观察表 5 可知, 对于实验方案 1 中泥饼的真厚和总厚而言质量分数

表 5 泥饼总厚极差分析结果
Table 5 Range analysis of total thickness of mud cake

参数	不同粒径(级配)下的极差			不同质量分数下的极差			不同滚动时间下的极差			备注
	200(200+150)目	150(200+100)目	100(150+100)目	6%	4%	2%	6 h	12 h	24 h	
k_i	3.55	3.85	3.87	3.47	4.31	3.49	3.93	3.74	3.60	
m_i	1.18	1.28	1.29	1.16	1.44	1.16	1.31	1.25	1.20	方案1
R		0.11			0.28			0.11		
k_i	3.16	2.34	2.82	2.69	2.38	3.25	2.61	2.81	2.90	方案2, 级配因
m_i	1.05	0.78	0.94	0.90	0.79	1.08	0.87	0.94	0.97	素时选用括号
R		0.27			0.29			0.10		中数值

表 6 泥饼韧度极差分析结果
Table 6 Range analysis of mud cake toughness

参数	不同粒径(级配)下的极差			不同质量分数下的极差			不同滚动时间下的极差			备注
	200(200+150)目	150(200+100)目	100(150+100)目	6%	4%	2%	6 h	12 h	24 h	
k_i	5.20	7.80	5.50	9.10	4.20	5.20	6.10	9.40	3.00	
m_i	1.73	2.60	1.83	3.03	1.40	1.73	2.03	3.13	1.00	方案1
R		0.87			1.63			2.13		
k_i	4.90	2.30	3.00	3.50	3.90	2.80	3.40	4.20	2.60	方案2, 级配因
m_i	1.63	0.77	1.00	1.17	1.30	0.93	1.13	1.40	0.87	素时选用括号
R		0.86			0.37			0.53		中数值

为 6% 的 200 目岩粉在滚动时间 6 h 后形成泥饼最薄；对于方案 2 而言，级配为(200+100)目时，质量分数为 2% 的岩粉滚动 24 h 后形成泥饼最薄。同理可知，表 6 中的方案 1 中 150 目的岩粉在质量分数为 6% 时滚动 12 h 后形成泥饼的韧度最大；对于方案 2 而言，级配为(200+150)目，质量分数为 4% 的岩粉在滚动 12 h 后形成泥饼韧度最大。

3.3 方差分析

通过方差分析可知生产和科学实验中哪些因素对实验结果有显著作用，方差结果越大则该因素对实验结果显著性影响越大。方差分析不仅弥补了极差分析方法无法精确反映误差项大小和其带来的影响，还弥补了极差分析不能对各因素进行显著性分析的缺点。本实验进行方差分析需用到以下公式^[19]：

$$S_T = S_E + S_A \quad (5)$$

$$S_E = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 \quad (6)$$

$$S_A = \sum_{i=1}^I n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2 \quad (7)$$

$$F = \frac{S_A / (I - 1)}{S_E / (N - I)} \quad (8)$$

式中 S_T 为总偏差平方和； S_A 为组间因素偏差平方和； S_E 为组内因素偏差平方和； I 为水平个数； N 为所有试验结果的个数； n_i 为样本的容量，此处取值为 3； X_{ij} 为某一因素在某一水平中对应的试验值； \bar{X} 为总体样本的均值； \bar{X}_i 为第 i 个子总体的样本均值； F 为统计量。

根据式(5)一式(8)，以泥饼总厚为实验指标进行计算，分析各因素对泥饼总厚影响的显著性。方案 1 和方案 2 中泥饼总厚方差分析结果见表 7。

表 7 的方差分析结果表明，对于试验方案 1 而言， F 值为质量分数 > 粒径 > 滚动时间，即对泥饼厚度影响从大到小的排序为质量分数、粒径、滚动时间；对于试验方案 2 来说， F 值为质量分数 > 级配 > 滚动时间，即岩粉的质量分数对泥饼厚度的影响最显著，其次为级配，再次为滚动时间。

表 7 泥饼总厚方差分析结果

Table 7 Variance analysis results of the total Thickness of mud cake

因素	偏差平方和	自由度	平均方差	F 值	备注
粒径	0.022	2	0.011	0.286	
质量分数	0.146	2	0.073	1.977	方案1
滚动时间	0.019	2	0.010	0.210	
级配	1.016	2	0.508	17.379	
质量分数	1.087	2	0.544	19.645	方案2
滚动时间	0.130	2	0.065	1.837	

根据式(5)一式(8)进行相关计算，以泥饼韧度为实验指标，通过方差分析，得出各因素的显著性，方差分析结果如表 8 所示。

表 8 泥饼韧度方差分析结果

Table 8 Variance analysis of mud cake toughness

因素	偏差平方和/ 10^{-5}	自由度	平均方差/ 10^{-5}	F 值	备注
粒径	1.214	2	0.607	4.868	
质量分数	4.023	2	2.012	19.977	方案1
滚动时间	6.221	2	3.112	37.700	
级配	1.086	2	0.543	56.320	
质量分数	0.186	2	0.093	5.365	方案2
滚动时间	0.384	2	0.192	12.387	

表 8 表明，对方案 1 而言， F 值从大到小依次为滚动时间 > 质量分数 > 粒径。这说明对方案 1 中的泥饼而言对泥饼韧度影响最显著的是滚动时间，其次为质量分数，粒径对泥饼韧性影响最小；对方案 2 来说， F 值的大小顺序为级配 > 滚动时间 > 质量分数，这说明在方案 2 中级配对泥饼韧度的影响最为显著。

4 结论

a. 侵入粒径为 200 目、质量分数为 6% 的硅质页岩岩粉在滚动 6 h 后形成的泥饼最薄，侵入粒径为 150 目、质量分数为 6% 的硅质页岩岩粉在滚动

12 h 后形成泥饼的韧度最大。

b. 侵入级配为(200+100)目, 质量分数为 2% 的硅质页岩岩粉滚动 24 h 后形成泥饼最薄, 侵入级配为(200+150)目, 质量分数为 4% 的硅质页岩岩粉在滚动 12 h 后形成泥饼韧度最大。

c. 钻井液中硅质岩粉质量分数的大小是影响泥饼厚度的主要因素, 其次为岩粉粒径, 影响最小的是滚动时间。

d. 以滚动时间和硅质岩粉的质量分数以及岩粉粒径为影响因素进行研究, 发现影响泥饼韧度最显著的是滚动时间和粒径, 岩粉的质量分数并不是决定泥饼韧度的主要因素。

e. 此次实验只研究了湘西北硅质页岩岩粉粒径在 100 目、150 目、200 目 3 个水平条件下侵入低固相钻井液体系中对泥饼性能的影响, 还可继续只改变目数不改变其他条件做正交试验, 最后得到侵入硅质页岩岩粉粒径对泥饼的影响规律, 为湘西北页岩气钻采中固相控制提供一定参考。

参考文献

- [1] 高莉, 张弘, 蒋官澄, 等. 鄂尔多斯盆地延长组页岩气井壁稳定钻井液[J]. 断块油气田, 2013, 20(4): 508-512.
GAO Li, ZHANG Hong, JIANG Guancheng, et al. Drilling fluid for wellbore stability of shale gas in Yanchang Formation, Ordos basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(4): 508-512.
- [2] SCHLEMMER R, FRIEDHEIM J E, GROWCOCK F B, et al. Chemical osmosis, shale, and drilling fluids[J]. SPE Drilling & Completion, 2003, 18(4): 318-331.
- [3] 范宜仁, 胡云云, 李虎, 等. 泥饼动态生长与泥浆侵入模拟研究[J]. 测井技术, 2013, 37(5): 11-13.
FAN Yiren, HU Yunyun, LI Hu, et al. Numerical simulation of mud-cake dynamic formation and reservoir mud filtrate invasion[J]. Well Logging Technology, 2013, 37(5): 11-13.
- [4] 黄立新, 王昌军, 罗春芝, 等. 油气层保护与内外泥饼关系的实验研究[J]. 断块油气田, 2000, 7(6): 24-26.
HUANG Lixin, WANG Changjun, LUO Chunzhi, et al. The laboratory study of relationship between reservoir protection and drilling fluid cake[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2000, 7(6): 24-26.
- [5] 王平全, 敬玉娟, 彭真, 等. 针对页岩气井钻井液的新型滤失造壁性能评价方法[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(2): 51-56.
WANG Pingquan, JING Yujuan, PENG Zhen, et al. New method for evaluating filtration and mud cake building performance of drilling fluid for shale drilling[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017, 34(2): 51-56.
- [6] 黄维安, 邱正松, 岳星辰, 等. 页岩气储层损害机制及保护水基钻完井液技术[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(3): 99-105.
HUANG Wei'an, QIU Zhengsong, YUE Xingchen, et al. Damage mechanism and water-based drilling fluid protection technology for shale gas reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum, 2014, 38(3): 99-105.
- [7] 陈德飞, 康毅力, 李相臣, 等. 煤层气钻井过程中钻井液对煤层储层损害评价[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(6): 44-49.
CHEN Defei, KANG Yili, LI Xiangchen, et al. Evaluation of reservoir damage caused by drilling fluid[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(6): 44-49.
- [8] GU Jun, HUANG Ju, ZHANG Su, et al. Solidifying mud cake to improve cementing quality of shale gas well: A case study[J]. Open Fuels & Energy Science Journal, 2015, 8(1): 149-154.
- [9] 杨宝林, 顾军, 郑涛, 等. 泥饼厚度对固井二界面胶结强度的影响[J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(1): 42-43.
YANG Baolin, GU Jun, ZHENG Tao, et al. the influences of mud cake thickness on bonding strength of the cement-formation interface[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009, 26(1): 42-43.
- [10] 王平全, 马瑞. 泥饼质量的影响因素研究[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(5): 21-25.
WANG Pingquan, MA Rui. Research on influential factors of mud cake quality[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2012, 29(5): 21-25.
- [11] FATTAH K A, LASHIN A. Investigation of mud density and weighting materials effect on drilling fluid filter cake properties and formation damage[J]. Journal of African Earth Sciences, 2016, 117: 345-357.
- [12] 王志龙, 杨龙龙, 罗跃, 等. 钻屑和黏土对重泥浆流变性能的影响及筛网目数在固相控制中的作用[J]. 化学工程师, 2014, 2(1): 9-12.
WANG Zhilong, YANG Longlong, LUO Yue, et al. Effects of drilling cuttings and bentonite clay on rheological properties of high density drilling fluid and mesh number impact on solid phase control[J]. Chemical Engineer, 2014, 2(1): 9-12.
- [13] 王剑波, 莫军, 熊跃, 等. 钻井液组份对泥饼抗剪强度的影响[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(3): 65-69.
WANG Jianbo, MO Jun, XIONG Yue, et al. Effect of composition of drilling fluid on filter cake shear strength[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2015, 32(3): 65-69.
- [14] 王利中, 王凤春. 浅谈厄瓜多尔钻井固控处理技术[J]. 西部探矿工程, 2017, 29(7): 56-58.
WANG Lizhong, WANG Fengchun. On Ecuador's drilling solid control technology[J]. Western Exploration Engineering, 2017, 29(7): 56-58.
- [15] 田明锦, 曹函, 孙平贺, 等. 离子稳定剂 ENI 对湘西北页岩气储层护壁机理的初探[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(3): 168-173.
TIAN Mingjin, CAO Han, SUN Pinghe, et al. Preliminary study on borehole wall protection mechanism of ionic stabilizer ENI for shale gas reservoir in northwestern Hunan[J]. Coal Geology &

Exploration, 2018, 46(3): 168-173.

[16] 张晓静, 乌效鸣, 蔡记华, 等. LG 植物胶泥浆在煤田复杂地层钻探中的应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2006, 33(12): 42-49.

ZHANG Xiaojing, WU Xiaoming, CAI Jihua, et al. Applying study on LG plant glue drilling mud for drilling in complicated coalfield strata[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2006, 33(12): 42-49.

[17] 董洪栋, 朱金勇, 陈礼仪, 等. 复杂地层低密度钻井液研究与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(1): 168-172.

DONG Hongdong, ZHU Jinyong, CHEN Liyi, et al. Research

and application of low-density drilling fluid for complex formation[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(1): 168-172.

[18] 周凤山, 王世虎, 李继勇, 等. 泥饼结构物理模型与数学模型研究[J]. 钻井液与完井液, 2003, 20(3): 4-8.

ZHOU Fengshan, WANG Shihu, LI Jiyong, et al. Mathematical & physical models for drilling fluid filter cake[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2003, 20(3): 4-8.

[19] 侯化国, 王玉民. 正交试验法[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1985.

(责任编辑 聂爱兰)

(上接第 199 页)

[9] 安红红, 王秀琴, 佟爱辉, 等. 在 CIFLog 平台上集成测井解释算法动态库的方法与应用[J]. 国外测井技术, 2017, 38(4): 28-31.

AN Honghong, WANG Xiuqin, TONG Aihui, et al. Method and application of integrated logging interpretation algorithm dynamic library on CIFLog platform[J]. World Well Logging Technology, 2017, 38(4): 28-31.

[10] 刘振, 潘懋, 李兆亮, 等. 基于 Petrel 的 Las 格式测井数据过滤器设计[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(3): 220-224.

LIU Zhen, PAN Mao, LI Zhaoliang, et al. Design of Petrel format logging data filter based on Las[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(3): 220-224.

[11] 郭海敏, 樊鹤, 张宫, 等. LAS 测井数据解析与批量转换方法研究[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(4): 89-91.

GUO Haimin, FAN He, ZHANG Gong, et al. LAS logging data analysis and batch conversion[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(4): 89-91.

[12] 马勇光. 测井数据格式解编框架设计及应用该框架实现 LAS

数据格式解编[D]. 长春: 吉林大学, 2008.

[13] 马晓波, 王国胜, 张石磊. C#程序开发实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 4.

[14] 卫大陆, 安涛. 建立“FORWARD 专栏”, 推动国产测井软件的发展和应[J]. 测井技术, 1999, 23(5): 55.

WEI Dalu, AN Tao. Establish “FORWARD column” to promote the development and application of domestic logging software[J]. Logging Technology, 1999, 23(5): 55.

[15] 张鹏飞, 夏朝辉, 张铭. GEOLOG 在海外油田地质研究中的应用: 以印尼西纳土纳盆地 A 油田为例[J]. 国外测井技术, 2017, 38(4): 24-27.

ZHANG Pengfei, XIA Chaohui, ZHANG Ming. Application of GEOLOG in overseas oilfield geology research: Take A field of Indonesian for example[J]. World Well Logging Technology, 2017, 38(4): 24-27.

(责任编辑 聂爱兰)