

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2020076

水平井高密度钻井液润滑减阻技术研究及现场试验

甄剑武^{1,2}

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要: 高密度水基钻井液在水平井钻井中普遍存在润滑性较差、摩阻较大等问题, 为此研究了润滑减阻技术。分析了高密度水基钻井液润滑减阻性能的影响因素, 研制了以长链脂肪酸植物油为原料的润滑剂 RHJ-1。性能评价结果表明: RHJ-1 能使 5.0% 膨润土浆的极压润滑系数降至 0.040; 密度 2.10 kg/L 的钻井液加入 RHJ-1 后, 其润滑系数最低可降至 0.105, 抗温能力达到 150 ℃; 钻屑加量为 10.0% 和 15.0%, RHJ-1 加量增大至 4.0% 时, 钻井液的润滑系数最大降低率达 55.58%。为了保证水平井钻井时高密度钻井液的润滑减阻作用, 还采取了控制固相含量、利用加重剂“轴承”效应等多种技术措施, 形成了水平井高密度钻井液润滑减阻技术。该技术在西南某深层页岩气区块 WY23-4HF 井进行了现场试验, 完钻时起钻摩阻仅 300 kN, 完全满足水平段钻井的润滑减阻要求。研究结果表明, 水平井高密度钻井液润滑减阻技术可行, 效果良好, 值得推广应用。

关键词: 水平井; 高密度钻井液; 水基钻井液; 润滑剂; WY23-4HF 井

中图分类号: TE254⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2020)05-0055-06

Research and Field Tests of the Lubrication and Friction Reduction Technology of High Density Drilling Fluid in Horizontal Wells

ZHEN Jianwu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 100101, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: Due to the poor lubricity and high friction during the drilling of horizontal wells by using high-density water-based drilling fluids, the lubrication and friction reduction technology was studied, and factors influencing the lubricity and friction reduction performance of high-density drilling fluids were analyzed. Subsequently, lubricant Rhj-1, a lubricant with long-chain fatty acid vegetable oil as the raw material, was developed. The performance evaluation results showed that the lubricant RHJ-1 could reduce the extreme pressure lubrication coefficient of 5.0% bentonite slurry to 0.040. The lubrication coefficient of drilling fluid with a density of 2.10 kg/L could be reduced to a minimum of 0.105 after adding lubricant RHJ-1, and its temperature resistance ability could reach 150 ℃. For the drilling fluids with cuttings powder dosages of 10.0% and 15.0%, when the dosage of lubricant RHJ-1 was increased to 4.0%, the maximum reduction rate of drilling fluid lubrication coefficient could reach 55.58%. In order to ensure the lubricity and friction reduction of high-density drilling fluids in drilling horizontal wells, technical measures such as controlling the solid content and making use of the "bearing" effect of weighting agent, etc. were taken, thereby forming the lubrication and friction reduction technology for high-density drilling fluids. This technology was tested in Well WY23-4HF located in the deep shale gas block in Southwest China, and the tripping out friction after drilling was only 300 kN, which fully met the requirements of lubrication and friction reduction in the drilling of horizontal section. The results showed that the high-density drilling fluid technology for lubrication and friction reduction for horizontal wells is feasible and effective, and is worthy for popularization and application.

Key words: horizontal well; high density drilling fluid; water-based drilling fluid; lubricant; Well WY23-4HF

水平井钻井过程中, 随着钻井工具与井壁的接触面积增大, 摩阻和扭矩随之增大, 易导致托压, 使钻压无法顺利施加到钻头, 造成工具面摆放困难, 从而影响钻井定向施工^[1-2]。在此情况下, 首选技术方案是提高钻井液的润滑能力, 降低钻具与地层之间的滑动摩擦力; 其次, 需要提高钻井液的滤失造壁性, 形成薄而韧的滤饼, 降低钻具滑动摩擦阻力; 此外, 还可以提高钻井液的携岩能力, 及时将钻屑

收稿日期: 2019-09-27; 改回日期: 2020-06-22。

作者简介: 甄剑武(1973—), 男, 河南汝州人, 1995年毕业于河南大学化学工程专业, 2011年获中国石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事钻井液技术研究工作。E-mail: zhenjw.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(编号: 2016ZX05061)、国家自然科学基金重大项目“页岩油气高效开发基础理论研究”(编号: 51490650)、中国石化科技攻关项目“威荣地区水基钻井液研究与应用”(编号: PE19013)和“深层页岩气高效钻完井技术”(编号: P18058-2)联合资助。

携带出井,减小岩屑床对钻具的摩阻^[3]。高密度钻井液中含有加重剂、封堵剂等大量有用固相,其固相容限相对较低,因此在实钻过程中钻屑等劣质固相分散进入钻井液后、对钻井液流变性和润滑性的影响较大,会出现钻井液井眼清洁能力下降、润滑减阻效果降低等问题,影响钻井施工效率,严重时还会导致卡钻故障^[4]。水平井应用高密度钻井液钻进时,如果钻井液润滑减阻性能较差,则造斜段和水平段钻进时发生卡钻的风险大大增加^[5-6]。为此,笔者以长链脂肪酸植物油为原料,研制了钻井液润滑剂 RHJ-1,制定了配套的控制固相含量、利用加重剂“轴承”效应等技术措施,形成了水平井高密度钻井液润滑减阻技术,并在 WY23-4HF 井进行了现场试验,验证了技术的可行性和有效性。

1 钻井液润滑性影响因素

水平井钻井过程中,影响钻井液润滑性的因素较多,主要分为工程因素(钻具组合、井眼轨迹和工程参数等)和钻井液因素^[2]。本文只讨论钻井液因素,主要包括润滑剂类型、固相含量和加重剂粒径。

1.1 润滑剂类型

不同类型润滑剂的润滑机理不同,适用环境和条件也不尽相同^[7-8]:固体润滑剂类似于滚珠轴承的作用,将滑动摩擦变为滚动摩擦,可大幅降低扭矩和阻力;液体润滑剂可在固体表面形成一层润滑膜,这层润滑膜存在于钻具与井壁之间,能大幅降低钻具摩阻。油基钻井液的润滑效果比水基钻井液更好,井下摩阻低的主要原因是其连续相为油相,具有较好的润滑性^[9-10]。水平井高密度钻井液用润滑剂具有较强的吸附能力和较好的降低摩擦系数的作用,能够吸附在钻具、套管和井眼表面,形成具有一定厚度和抗压能力的疏水润滑膜,当钻具与井壁发生干摩擦和边界摩擦时,润滑膜不易被外力破坏^[11]。

1.2 固相含量

高密度钻井液的固相含量对钻井液润滑性的影

响比较大。钻井液中加重剂和其他有用固相所占体积分数较大,钻井过程中钻屑等劣质固相不可避免地会分散进入钻井液,导致钻井液总固相含量升高、自由水含量相对降低^[12]。因此,钻井液循环流动过程中,各种固相颗粒之间、固相与液相之间及液相内部碰撞摩擦增多,表现为钻井液黏度、切力和黏附系数升高,反映在井下即活动钻具时摩阻增大^[13]。由此可见,控制高密度钻井液中的固相含量对其润滑减阻性能非常重要。

1.3 加重剂粒径

高密度钻井液中固相的粒径对钻井液的润滑性能也有影响。高密度钻井液含有大量加重剂,研究表明^[12,14-15],粒径大于 10.0 μm 的加重剂颗粒具有一定的“轴承”效应。当采用重晶石粉加重时,密度达到 1.40 kg/L 左右时摩擦系数最高,之后摩擦系数随着密度增大而逐渐下降,密度大于 1.80 kg/L 后趋于稳定。这是因为随着重晶石加量增大,具有“轴承”效应的颗粒逐渐增多,因此出现摩擦系数先升高后降低的变化趋势。

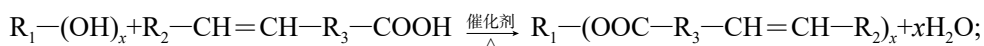
综上所述,要提高高密度钻井液的润滑性,首先要研制或选用合适的润滑剂类型,液体润滑剂是首选;其次要控制好钻井液的固相含量,尤其是劣质固相含量;此外,还要考虑重晶石粉的粒径分布。

2 润滑剂的研制与性能评价

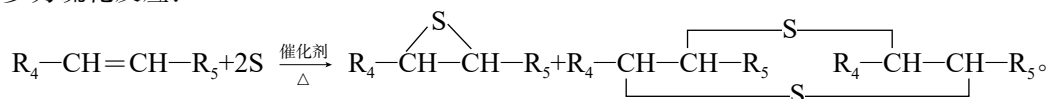
2.1 润滑剂 RHJ-1 的研制

大多数润滑剂的基础油为矿物油,但考虑其芳烃含量、分子改性的便利性及经济环保性要求,以长链脂肪酸植物油为原材料合成润滑剂。

合成步骤:长链脂肪酸含有不饱和双键,首先与醇类通过酯化反应得到中间产物脂肪酸酯,然后引入硫元素(硫元素可在极压下发生摩擦化学反应,生成吸附能力较强的无机润滑膜)进行硫化改性反应,反应过程中用氮气吹扫保护反应体系防止氧化,最后冷却得到一种新的极压润滑物质 RHJ-1。即反应分 2 步,第一步为酯化反应:



第二步为硫化反应:



采用红外光谱仪测定长链脂肪酸和硫化产物

RHJ-1 的红外图谱,结果如图 1 和图 2 所示。

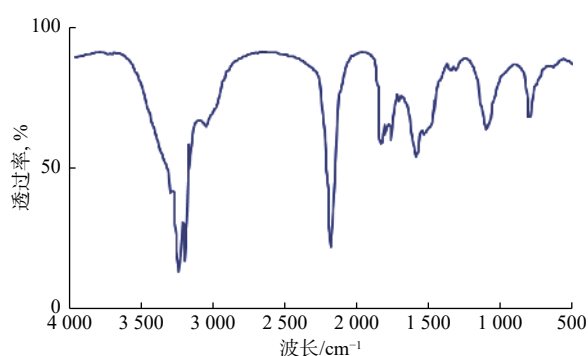


图 1 植物油红外光谱

Fig. 1 Infrared spectrum of the vegetable oil

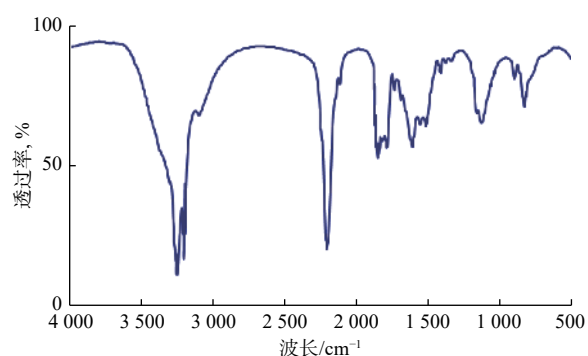


图 2 RHJ-1 的红外光谱

Fig. 2 Infrared spectrum of the lubricant RHJ-1

由图 1 和图 2 可知, 1740 cm^{-1} 的 $\text{C}=\text{O}$ 吸收峰、 1245 cm^{-1} 和 1167 cm^{-1} 的 $\text{C}-\text{O}$ 吸收峰未发生变化, 说明硫化反应过程中酯基未参与反应。 797 cm^{-1} 的吸收峰是 $\text{C}-\text{S}-\text{C}$ 的特征峰, 充分说明硫化反应加成到了 $\text{C}=\text{C}$ 双键, 从而在 RHJ-1 分子中形成了 $\text{C}-\text{S}-\text{C}$ 的结构。

2.2 润滑剂 RHJ-1 的性能评价

以 5.0% 膨润土浆为基浆, 加入不同体积分数的润滑剂 RHJ-1, 进行极压润滑性测试, 并用三维形貌表征滑块摩擦面的粗糙度, 试验结果如表 1 所示。

表 1 极压润滑系数和摩擦面粗糙度

Table 1 Extreme pressure lubrication coefficient and friction surface roughness

钻井液配方	极压润滑系数	摩擦面粗糙度/ μm
5.0% 膨润土浆	0.372	38.42
5.0% 膨润土浆+0.5%RHJ-1	0.248	36.02
5.0% 膨润土浆+1.0%RHJ-1	0.074	34.68
5.0% 膨润土浆+1.5%RHJ-1	0.049	33.16
5.0% 膨润土浆+2.0%RHJ-1	0.040	31.95
5.0% 膨润土浆+2.5%RHJ-1	0.042	32.08

由表 1 可知, 随着 RHJ-1 加量增大, 滑块摩擦面的粗糙度和极压润滑系数均呈降低趋势; 加量达到 1.5% 以上时, 粗糙度和极压润滑系数的降低趋势变缓并趋于平稳。加入润滑剂 RHJ-1 后, RHJ-1 分子的强吸附基团吸附在滑块表面, 疏水端朝外形成了润滑膜, 减少了滑块之间的直接摩擦, 降低了滑块摩擦面的粗糙度, 表现为膨润土浆的润滑性得到了改善。

3 高密度钻井液配方及性能评价

3.1 基浆配方

一般情况下, 高密度钻井液应用井段较深。由于受地层温度、水敏性等因素影响, 钻井液要具有较强的抗温性和抑制性。因此, 以应用较多的具有较好抗高温强抑制性的 KCl 聚磺钻井液为研究对象, 考察了润滑剂 RHJ-1 加量对高密度钻井液性能的影响。

基于上述原因, 得到了高密度钻井液基浆配方: 1.5% 膨润土+0.5%PAC-LV+3.0%SMP-II+3.0%SPNH+3.0% 磺化沥青+3.0%QS-2(400 目)+7.0%KCl+RHJ-1+重晶石粉。

3.2 钻井液性能评价

3.2.1 RHJ-1 加量对钻井液润滑性的影响

密度 2.10 kg/L 的钻井液基浆中加入不同量的润滑剂 RHJ-1, 测定其在高温 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下滚动老化 16 h 前后的润滑系数, 结果如图 3 所示。

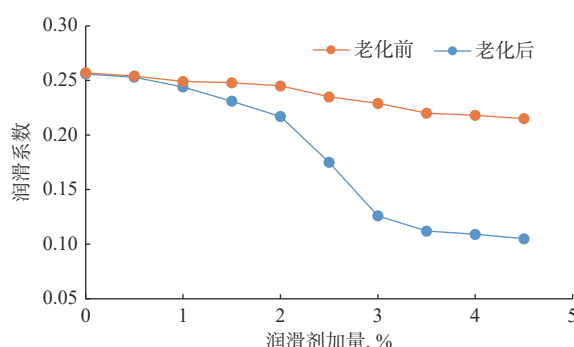


图 3 润滑剂加量对钻井液润滑系数的影响

Fig.3 Effect of lubricant dosage on the lubrication coefficient of drilling fluids

由图 3 可知, 钻井液基浆加入润滑剂 RHJ-1 后, 老化前的润滑系数呈下降趋势, 但下降幅度不大; 老化后的钻井液润滑系数下降趋势明显。分析认为, 这是因为 RHJ-1 均匀分散到钻井液中需要一个过程, 在钻井液老化前润滑剂尚未充分发挥作用,

因此测试得到的极压润滑系数较高;而经高温老化后, RHJ-1 在钻井液中分散均匀, 使钻井液的润滑性提高, 减小了滑块之间的摩擦阻力。随着 RHJ-1 加量增大, 钻井液的润滑性逐渐增强; RHJ-1 加量大于 2.0% 时, 极压润滑系数开始大幅降低; 加量大于 3.0% 时逐渐趋于稳定。这表明 RHJ-1 具有良好的抗温性能, 且加量为 3.0% 时润滑效果最佳。

根据图 3 的分析结果, 测定不同密度钻井液中加入 3.0% RHJ-1 后的润滑系数, 以考察 RHJ-1 提高钻井液润滑性的能力。大多数高密度钻井液的密度为 1.90~2.30 kg/L, 故选用密度分别为 1.90, 2.10 和 2.30 kg/L 的 3 种钻井液基浆进行试验, 结果如图 4 所示。

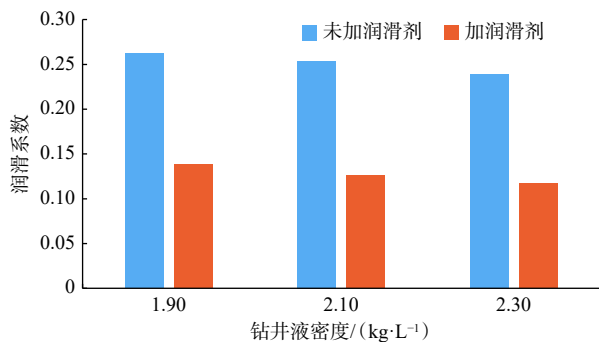


图 4 润滑剂 RHJ-1 对钻井液润滑系数的影响

Fig.4 Effect of the lubricant RHJ-1 on the lubrication coefficient of drilling fluids

从图 4 可以看出: 未加润滑剂 RHJ-1 时, 随着钻井液密度升高, 其润滑系数有所下降; 加入润滑剂 RHJ-1 后, 钻井液润滑系数均大幅度降低, 且随着钻井液密度升高, 润滑系数有一定程度的下降。分析认为, 高密度钻井液中粒径 10 μm 以上的“轴承”颗粒含量较多, 使钻井液的润滑性得到较大提高。这说明 RHJ-1 对高密度钻井液的润滑性具有较好的促进作用。

3.2.2 钻井液的配伍性评价

根据上述评价结果, 在密度 1.90, 2.10 和 2.30 kg/L 的 3 种钻井液基浆分别加入 3.0% RHJ-1, 在 150 ℃ 下滚动老化 16 h, 测试 RHJ-1 对钻井液塑性黏度、API 滤失量等性能的影响情况, 结果见图 5 和图 6。

由图 5 可知, 润滑剂 RHJ-1 对不同密度钻井液都有一定的增黏作用。这主要是因为 RHJ-1 在钻井液中呈分散状态, 导致黏度小幅升高, 但对钻井液流变性的影响不大。

由图 6 可知, 加入润滑剂 RHJ-1 后, 钻井液的

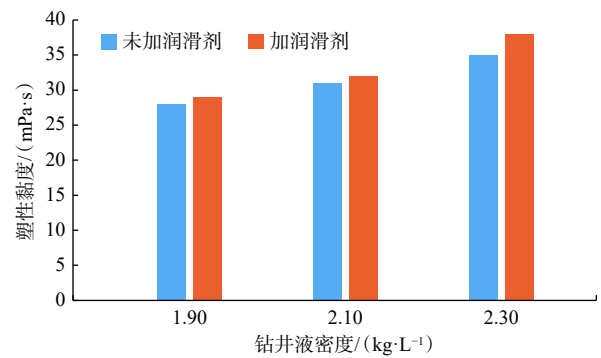


图 5 润滑剂 RHJ-1 对钻井液塑性黏度的影响

Fig.5 Effect of the lubricant RHJ-1 on the PV of drilling fluids

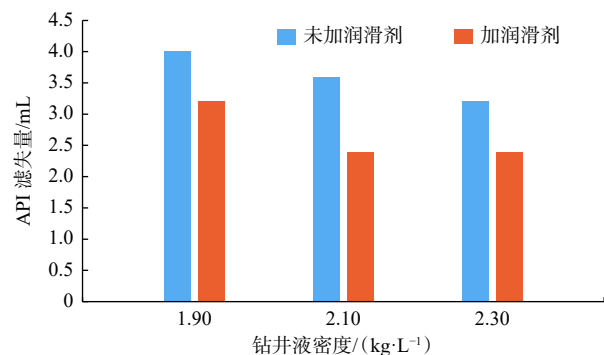


图 6 润滑剂 RHJ-1 对钻井液 API 滤失量的影响

Fig.6 Effect of the lubricant RHJ-1 on the API filtration of drilling fluids

API 滤失量有所降低。这是因为, RHJ-1 分散进入钻井液后形成较小液滴, 起到了一定的封堵降滤失作用。这说明 RHJ-1 对钻井液流变性的影响较小, 且有利于提高钻井液的滤失造壁性。

3.2.3 钻屑对钻井液润滑性的影响

在密度 2.10 kg/L 的钻井液中分别加入 3.0% 和 4.0% RHJ-1, 在 150 ℃ 高温下滚动 16 h, 再分别加入 5.0%、10.0% 和 15.0% 钻屑 (200 目龙马溪组页岩气地层岩屑, 模拟钻屑分散进入钻井液), 考察钻屑对钻井液润滑性的影响, 结果如表 2 所示。

表 2 钻屑对钻井液润滑性的影响

Table 2 Effect of cuttings on the lubricity of drilling fluids

钻屑加量, %	基浆润滑系数	基浆+3.0% RHJ-1		基浆+4.0% RHJ-1	
		润滑系数	降低率, %	润滑系数	降低率, %
0	0.254	0.126	50.39		
5.0	0.278	0.147	47.12		
10.0	0.341	0.172	49.56	0.162	52.49
15.0	0.394	0.197	50.00	0.175	55.58

由表2可知,钻井液中加入泥页岩钻屑后,润滑性有所降低。主要原因是,加入钻屑增大了钻井液中的固相含量,导致摩擦阻力增大。加入3.0%润滑剂RHJ-1后,钻井液润滑系数大幅下降;加入10.0%和15.0%钻屑,并将RHJ-1的加量增大到4.0%时,钻井液的润滑系数进一步降低,降低率可达55.58%,但润滑系数的总体变化趋势仍是随着钻屑加量增大而升高。因此,应用中可根据实际情况增大润滑剂RHJ-1的加量,但需要提高固控设备清除钻屑的效率,尽可能减少钻屑进入钻井液的量。

RHJ-1性能评价及高密度钻井液的润滑性能评价结果表明,该润滑剂在稠密钻井液中有较好的润滑效果。但稠密钻井液固相含量高,应控制固相含量,特别是应该尽量减少钻井液中的钻屑,降低其对钻井液润滑性的影响。

4 润滑减阻措施

水平井钻井过程中,随着井斜角增大和水平段延伸,固相含量逐渐升高,导致钻井液黏切增大,对润滑减阻的要求很高。虽然使用润滑剂是水平井稠密钻井液润滑减阻的关键,但是钻井过程中诸多因素影响其效果,因此需要采取针对性的润滑减阻措施:

1)造斜段钻进时,以定向钻进不托压为目的,根据井斜角变化和井下摩阻情况,调整润滑剂加量,降低钻井液润滑系数。

2)水平段钻进时,随着水平段延长,需要适当增大润滑剂加量。由于受固控设备效率所限,钻屑不断研磨分散变细,固相含量会逐渐升高,对润滑剂的吸附消耗量增大,故需增大润滑剂加量,以保持钻井液的润滑性。

3)滑动定向钻进时,以细水长流的形式补充润滑剂,以保证滑动定向作业顺利进行。

4)加强短起下钻,用稠浆清扫井眼清除岩屑床,必要时大排量循环,以提高携岩效率、冲刷虚滤饼,保持较好的井眼条件。

5)控制钻井液的固相含量。振动筛采用200目以上筛布,提高其他固控设备运行效率,以清除钻屑,必要时补充稀胶液。

5 现场试验

采用RHJ-1润滑剂配制了稠密水基钻井液,

并制定了配套的润滑减阻措施,形成了水平井稠密钻井液润滑减阻技术,并在四川盆地某区块水平井WY23-4HF井造斜段、水平段进行了现场试验,取得了显著效果。

该区块目的层埋深超过3 800 m,地层温度140℃,钻井液密度2.05~2.15 kg/L。WY23-4HF井三开井段为3 430~5 546 m,造斜段长616 m,水平段长1 500 m。WY23-4HF井三开应用稠密钻井液降摩减阻技术顺利完钻,起钻时摩阻仅为300 kN,与应用油基钻井液的邻井WY23-1HF井摩阻245 kN相当,与应用水基钻井液的邻井WY23-2HF井相比摩阻降幅达45.5%(见图7)。

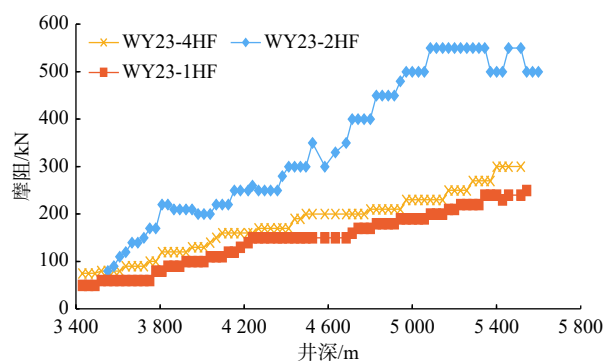


图7 WY23-4HF井三开完钻起钻摩阻与邻井对比情况
Fig.7 Comparison of tripping out friction with that of offset wells after drilling of 3rd-spud section in Well WY 23-4HF

现场试验发现,钻进水平段过程中,钻屑不断分散进入钻井液,导致钻井液黏切升高、摩阻增大,且细分散钻屑比表面积较大,增大了对润滑剂的吸附量。比较明显的是,钻至A靶点(井深4 046 m处)时起钻更换钻具,下钻到底后循环钻井液,钻井液的漏斗黏度从62 s升高至82 s,表观黏度从51 mPa·s升高至58 mPa·s;经加大胶液量维护,黏度有所降低。分析认为其主要原因是,虽然固控设备可以清除大颗粒钻屑,但难以清除细颗粒钻屑,使其在钻井液中不断积累;另外,起下钻过程中,钻具对井壁滤饼的刮擦和对钻屑的反复研磨,也会导致细颗粒钻屑进入钻井液中。

6 结 论

1)以长链脂肪酸植物油为原料研制的润滑剂RHJ-1具有较好的润滑作用,能降低摩擦面的粗糙度,提高稠密钻井液的润滑能力。

2)润滑剂RHJ-1与钻井液配伍性良好,对钻井

液的流变性影响较小,能降低钻井液的滤失量,有助于提高钻井液的滤失造壁性。

3)以润滑剂 RHJ-1 配制了高密度水基钻井液,并制定配套的润滑减阻措施,形成了水平井高密度钻井液润滑减阻技术。采用该技术钻进水平井造斜段、水平段时,钻井施工顺利,完钻时起钻摩阻较小,取得了显著效果。

参 考 文 献

References

- [1] 邓兴强. 深层水平井钻井液技术难点及设计方案研究[J]. 西部探矿工程, 2019, 31(6): 85–86.
DENG Xingqiang. Study on technical difficulties and design scheme of drilling fluid for deep horizontal well[J]. West-China Exploration Engineering, 2019, 31(6): 85–86.
- [2] 刘永贵. 大庆致密油藏水平井高性能水基钻井液优化与应用[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1): 35–39.
LIU Yonggui. Optimization and application of high performance water-based drilling fluid for horizontal wells in Daqing Tight Oil Reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 35–39.
- [3] 许艳东. 定向钻井中托压机理分析及应对策略探讨[J]. 中国新技术新产品, 2017(19): 51–52.
XU Yandong. Mechanism analysis and countermeasure discussion of underpinning in directional drilling[J]. New Technology & New Products of China, 2017(19): 51–52.
- [4] 王琳, 董晓强, 杨小华, 等. 高密度钻井液用润滑剂 SMJH-1 的研制及性能评价[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(1): 28–32.
WANG Lin, DONG Xiaoqiang, YANG Xiaohua, et al. Development and evaluation of a high density fluid lubricant[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(1): 28–32.
- [5] LI Xin, GAO Deli, LU Baoping, et al. Study on modified maximum extension length prediction model for horizontal wells considering differential sticking[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 183: 106371.
- [6] 吴江, 李炎军, 张万栋, 等. 南海莺歌海盆地中深层高温高压水平井钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(2): 63–69.
WU Jiang, LI Yanjun, ZHANG Wandong, et al. Key drilling techniques of HTHP horizontal wells in mid-deep strata of the Yinggehai Basin, South China Sea[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(2): 63–69.
- [7] 魏昱, 王骁男, 安玉秀, 等. 钻井液润滑剂研究进展[J]. 油田化学, 2017, 34(4): 727–733.
WEI Yu, WANG Xiaonan, AN Yuxiu, et al. Research development of drilling fluid lubricant[J]. Oilfield Chemistry, 2017, 34(4): 727–733.
- [8] 屈沅治, 黄宏军, 汪波, 等. 新型水基钻井液用极压抗磨润滑剂的研制[J]. 钻井液与完井液, 2018, 35(1): 34–37.
QU Yuanzhi, HUANG Hongjun, WANG Bo, et al. Development of extreme pressure anti-wear lubricant MPA for water base drilling fluids[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2018, 35(1): 34–37.
- [9] 艾贵成, 王卫国, 张宝峰, 等. 深井高温高密度钻井液润滑性控制技术[J]. 西部探矿工程, 2009, 21(6): 42–44.
AI Guicheng, WANG Weiguo, ZHANG Baofeng, et al. Lubrication control technology of high temperature and high density drilling fluid for deep well[J]. West-China Exploration Engineering, 2009, 21(6): 42–44.
- [10] 刘建军, 刘晓栋, 王彪. 钻井液用低荧光光高效极压润滑剂 BDLU-100L 的性能研究[J]. 油田化学, 2016, 33(2): 200–203.
LIU Jianjun, LIU Xiaodong, WANG Biao. Performance of low fluorescence and high efficiency extreme-pressure lubricant BDLU-100L for drilling fluid[J]. Oilfield Chemistry, 2016, 33(2): 200–203.
- [11] 王亮. 青海哇玉地区岩心钻探润滑减阻钻井液研究[J]. 探矿工程(岩石钻掘工程), 2013, 40(增刊1): 203–206, 209.
WANG Liang. Study on lubrication and drag reduction drilling fluids for core drilling in Wayu Area of Qinghai[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(supplement 1): 203–206, 209.
- [12] 黄维安, 邱正松, 钟汉毅, 等. 高密度钻井液加重剂的研究[J]. 国外油田工程, 2010, 26(8): 37–40.
HUANG Weian, QIU Zhengsong, ZHONG Hanyi, et al. Study on heavier agent for high density drilling fluid[J]. Foreign Oilfield Engineering, 2010, 26(8): 37–40.
- [13] 汪露, 王伟志, 杨中强. 塔河油田钻井液固相控制技术[J]. 钻采工艺, 2015, 38(6): 102–104.
WANG Lu, WANG Weizhi, YANG Zhongqiang. Solid phase control technology of drilling fluid in Tahe Oilfield[J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(6): 102–104.
- [14] 潘谊党, 于培志, 马京缘. 高密度钻井液加重材料沉降问题研究进展[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(1): 1–9.
PAN Yidang, YU Peizhi, MA Jingyuan. Progresses in research on settling of weighting materials in high density drilling fluids[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(1): 1–9.
- [15] 马勇, 崔茂荣, 杨冬梅, 等. 加重剂对水基钻井液润滑性能的影响研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 58–60.
MA Yong, CUI Maorong, YANG Dongmei, et al. Study on influence of heavyweight additives on lubricity of water-based drilling fluids[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(10): 58–60.

[编辑 令文学]