

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2019113

钻井液环保润滑剂 SMLUB-E 的研制及应用

钱晓琳, 宣 扬, 林永学, 杨小华

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要: 针对现有钻井液润滑剂耐温与环保性能难以兼顾的不足, 以天然脂肪酸、有机多元醇等为原料, 合成了钻井液环保润滑剂 SMLUB-E。室内试验发现: 膨润土浆中加入 1.0% SMLUB-E 时, 摩阻系数可降至 0.05, 且形成的润滑膜强度高; 聚磺钻井液中加入 2.0% SMLUB-E, 可使摩阻系数从 0.31 降至 0.08, 其润滑性能优于加入 8.0% 原油; SMLUB-E 耐温 160 ℃, 对钻井液的流变性、滤失量无不利影响, 无毒, 环保性能好。SMLUB-E 在塔河油田 TP238CH 井等深井进行了现场应用, 加入 SMLUB-E 的钻井液中表现出良好的润滑降摩性能, 大幅降低了井下摩阻, 避免了托压、卡钻等复杂情况发生。研究结果表明, SMLUB-E 具有良好的耐温性与环保性, 能有效解决深井超深井钻井井下摩阻大的技术难题。

关键词: 钻井液; 润滑剂; 环境保护; 摩阻; 现场应用

中图分类号: TE254⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2020)01-0034-06

Development and Application of an Environmental-Friendly Drilling Fluid Lubricant SMLUB-E

QIAN Xiaolin, XUAN Yang, LIN Yongxue, YANG Xiaohua

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: SMLUB-E, an environmental-friendly drilling fluid lubricant, was synthesized from natural fatty acids and organic polyols because the existing drilling fluid lubricant was not sufficiently temperature-resistant, nor did it have sufficient environmental friendliness. An evaluation conducted indoors in laboratory conditions demonstrated that when 1.0% SMLUB-E was added to bentonite mud, the friction coefficient could be as low as 0.05 while maintaining a high strength of lubricating film. When 2.0% SMLUB-E was added to polysulfonate drilling fluid, the friction coefficient decreased from 0.31 to 0.08 with lubricity better than that of 8.0% crude oil added. SMLUB-E has a temperature resistance of 160 ℃, which has no adverse effect on rheological property and fluid loss of drilling fluid. Further, SMLUB-E is easy to biodegrade, non-toxic and environmental-friendly. Field Applications of SMLUB-E has conducted on deep wells including Well TP238CH in Tahe Oilfield, the drilling fluids added SMLUB-E showed good lubrication and friction-reducing property, significantly reduced downhole friction, avoided complex situations such as WOB hang-off and sticking, etc.. The results showed that SMLUB-E has a good performance in temperature resistance and environmental friendliness, and could effectively solve the technical problem of large downhole friction in the drilling of deep & ultra-deep wells.

Key words: drilling fluid; lubricant; environmental protection; frictional drag; field application

常用钻井液润滑剂一般分为固体和液体 2 类^[1-3]。与液体润滑剂相比, 惰性固体润滑剂影响固相控制, 且难以降解, 易伤害储层和污染环境。液体润滑剂按照其主要成分, 可分为矿物油、聚 α -烯烃、脂肪酸酯、磷酸酯和烷基糖苷等类别^[4-13]。其中, 矿物油类润滑剂耐温、耐盐性能较好, 但生物降解性差、荧光级别高、毒性大; 其他液体润滑剂虽然毒性低, 但在高温下易水解、起泡及影响钻井液的流变性。目前, 国内深层水平井在应用水基钻井液钻井时, 通常加入 5.0%~

12.0% 的原油, 以降低摩阻和扭矩、减少卡钻等井下故障^[14]。然而, 原油不但会对录井的准确度造成影响, 而且废弃混油钻井液后期处理困难、环境污染风险高。

收稿日期: 2018-10-29; 改回日期: 2019-12-27。

作者简介: 钱晓琳 (1978—), 女, 陕西蒲城人, 1999 年毕业于南京工业大学高分子化工专业, 2006 年获北京理工大学材料专业博士学位, 教授级高级工程师, 主要从事钻井液体系及处理剂的研究工作。E-mail: qianxl.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项“耐高温高性能钻井液体系及井筒强化技术”(编号: 2017ZX05005-005-002) 资助。

因此,研制满足环保要求且无荧光的耐温钻井液润滑剂具有重要意义。合成脂肪酸酯类环保型液体润滑剂因兼具优异的润滑性、环保性、热氧化稳定性、水解稳定性和较好的低温流动性,并能通过分子结构优化进一步改善其性能,因此日益受到重视^[15-19]。尽管合成酯类润滑剂具有优异的综合性能,但其成本高,耐温性能也不够好,限制了其推广应用^[20]。为此,笔者以工业废弃植物油中的脂肪酸为主要原料,研制了耐温且环保的合成脂肪酸酯类钻井液环保润滑剂 SMLUB-E^[21],在降低成本的同时,可克服现有润滑剂耐温性与环保性无法兼顾的不足,在缓解环保压力的同时,解决复杂结构井钻井过程中井下摩阻大的技术难题。

1 SMLUB-E 的设计与合成

1.1 分子结构设计思路

环保润滑剂应同时满足毒性低和润滑性良好的要求,因此,设计思路为:1)分子结构中不应含有多环芳烃类物质,以降低对环境的污染程度和荧光含量;2)应选用易于降解的天然脂肪酸类和醇类作为原料,以提高环保性和生物降解性;3)应具有双亲结构,其中亲水基团使润滑剂能够在金属表面牢固吸附并形成稳定的润滑膜,而疏水基团不仅会降低接触面间的摩擦阻力,而且会决定润滑膜的厚度和强度,使润滑膜在受到较大载荷时不易被破坏;4)应含有能与金属结合形成极压膜的极压元素,以提高极压润滑性能;5)为提高抗温能力和抗盐能力,优选合适相对分子质量的有机物为基础物,且其分子结构中的极性吸附基团不能与钙、镁离子反应,以免引起破乳,导致其润滑能力降低。

1.2 SMLUB-E 的合成

以天然脂肪酸(工业废弃植物油中的脂肪酸)、有机多元醇等为基础原料,合成环保润滑剂 SMLUB-E。具体合成步骤:1)合成出含饱和和化学键与活性反应基的聚合酯;2)对合成的聚合酯进行改性反应,引入极压元素与强吸附基团;3)在改性聚合酯上引入极性较大的基团。最终制得黄褐色透明液体润滑剂 SMLUB-E,其分子结构如图 1 所示。

2 SMLUB-E 室内性能评价

2.1 SMLUB-E 的润滑性

2.1.1 膨润土浆加入 SMLUB-E 后的润滑性

参照中国石化企业标准《水基钻井液用润滑剂

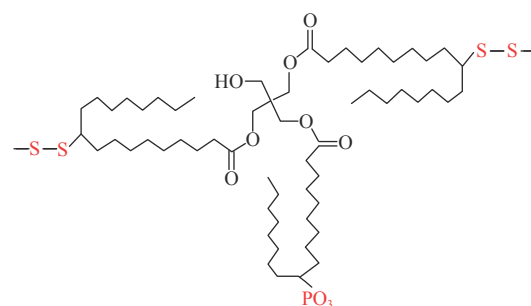


图 1 SMLUB-E 的分子结构示意图

Fig. 1 Molecular structure of SMLUB-E

技术要求》(Q/SHCG 4—2011)中的技术指标与试验方法,评价了润滑剂 SMLUB-E 的润滑性。

1)润滑性试验。采用 FANN 21200 型极压润滑仪,测试了 5.0% 膨润土浆中加入 1.0% SMLUB-E 后的摩阻系数,并与加入原油后的摩阻系数进行了对比(试验条件为 160 ℃ 温度下老化 16 h),结果如图 2 所示。

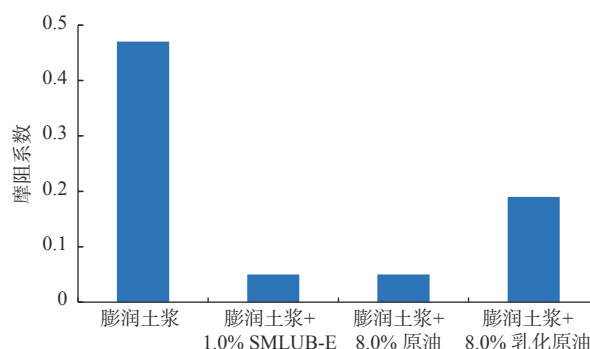


图 2 膨润土浆中分别加入 SMLUB-E 与原油后的摩阻系数

Fig.2 Friction coefficient of bentonite mud after adding SMLUB-E and crude oil respectively

从图 2 可以看出:在 160 ℃ 下老化 16 h 后,膨润土浆的摩阻系数高达 0.47;加入 1.0% SMLUB-E 后,摩阻系数显著降低(降至 0.05),表现出较好的润滑性能;膨润土浆中加入 8.0% 原油后,摩阻系数同样降至 0.05,说明加入原油也能够起到良好的润滑作用。但由于原油无法在水中分散,钻井液中混入原油时通常需要同时加入 0.2%~0.5% 的水包油型乳化剂(如 OP-10)对原油进行乳化,提高其在钻井液中的分散性,否则很容易被固相控制设备筛除,增大消耗量。然而,原油与 0.5% 乳化剂 OP-10 形成乳化原油后,其润滑效果显著降低,膨润土浆中加入 8.0% 乳化原油,其摩阻系数仅为 0.19。其原因是:一方面,原油乳化后大部分原油油滴被乳化剂分子包裹,丧失了疏水性;另一方面,由于乳化剂分子亲水端的极性高于原

油,因此优先在金属表面吸附,导致原油油滴在金属表面的吸附量降低。

2)极压膜强度试验。SMLUB-E除了通过极性基团的物理吸附和化学吸附在金属表面形成一层润滑膜外,在受到较大压力的摩擦时,极压元素还可与金属作用形成极压膜。因此,当钻具表面受到高温和高载荷作用时,润滑膜不易被破坏。用FANN 21200型极压润滑仪对SMLUB-E形成的极压膜强度进行了评价,并与8.0%乳化原油(成分同上)进行了对比,结果见表1。

表 1 SMLUB-E 形成的极压膜强度
Table 1 Strength of extreme pressure film formed by SMLUB-E

负载扭矩/ (N·m)	极压润滑仪表盘读数	
	5.0%膨润土浆+ 8.0%乳化原油	5.0%膨润土浆+ 1.0% SMLUB-E
5.6	22	6
11.3	38	10
16.9	54	14
22.6	62	18
28.2	咬合	21
33.5		24
39.5		26
45.2		30
50.8		咬合

从表1可以看出,当FANN 21200型极压润滑仪的负载扭矩达到28.2 N·m时,加入8.0%乳化原油膨润土浆中的滑块和滑环之间即会咬合;而加入1.0% SMLUB-E膨润土浆中的滑块与滑环的负载扭矩达到50.8 N·m时才会咬合,说明SMLUB-E形成的极压膜具有较高的强度,在受到较高负载时也不易被破坏。

2.1.2 聚磺钻井液加入 SMLUB-E 后的润滑性

聚磺钻井液中加入2.0%的SMLUB-E,在160℃下老化16 h后,分别采用FANN 21200型极压润滑仪和NZ-3型滤饼黏滞系数测定仪,测试其摩阻系数与滤饼黏滞系数,考察聚磺钻井液加入SMLUB-E后的润滑性,并与其加入原油和乳化原油后的润滑性进行了对比,结果如图3所示。聚磺钻井液的配方为3.0%膨润土+0.3%PAC-LV+0.2%PFL-H+3.0%SPNH+2.0%SMC+0.2%NaOH+加重剂BaSO₄,密度为1.30 kg/L,pH值为9.5,下同;乳化原油成分同上。

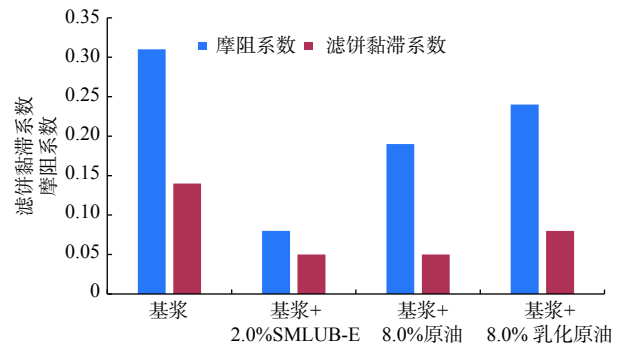


图 3 SMLUB-E 与原油在聚磺钻井液中的润滑效果对比
Fig. 3 Comparison of lubricating effect between SMLUB-E and crude oil in polysulfide drilling fluid

从图3可以看出,聚磺钻井液的摩阻系数为0.31,加入2.0% SMLUB-E和8.0%原油后,其摩阻系数分别降至0.08和0.19,说明SMLUB-E在聚磺钻井液中的润滑效果要优于原油;而加入8.0%乳化原油后,摩阻系数仅降至0.24,其降低幅度低于原油。这一方面是因为极性相对较强的磺化处理剂(SPNH和SMC)在金属表面优先吸附,从而阻碍了原油的吸附;另一方面可能是由于磺化处理剂能够在一定程度上乳化原油。此外,由图3还可以看出,无论是SMLUB-E还是原油均能够显著降低滤饼黏滞系数。

2.1.3 SMLUB-E 的耐温性试验

在5.0%膨润土浆中加入1.0% SMLUB-E,在不同温度下老化16 h后,测定其摩阻系数,以考察SMLUB-E的耐温性,结果如图4所示。

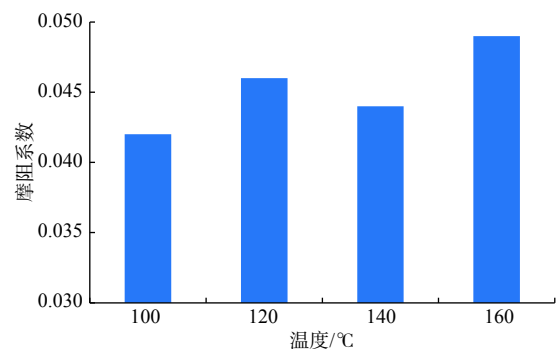


图 4 加入 SMLUB-E 的膨润土浆在不同温度下老化后的摩阻系数

Fig.4 Post-aging friction coefficient of bentonite mud with SMLUB-E at different temperatures

从图4可以看出,随着老化温度从100℃升高至160℃,膨润土浆摩阻系数变化幅度不大,始终保持在0.04~0.05,说明SMLUB-E在高温下具有较好的润滑性,耐温可达160℃。

2.2 SMLUB-E 对钻井液流变性和滤失性的影响

通过改变 SMLUB-E 的加量,评价了 SMLUB-E 对膨润土浆和聚磺钻井液流变性和滤失性的影响程度,结果见表 2。试验条件为 160 ℃ 下老化 16 h。

表 2 SMLUB-E 对膨润土浆和聚磺钻井液流变性和滤失性的影响

Table 2 Influence of SMLUB-E on rheological and filtration properties of bentonite mud and polysulfide drilling fluid

试验浆体	表观黏度/ (mPa·s)	塑性黏度/ (mPa·s)	动切力/ Pa	API 滤失 量/mL
5.0%膨润土浆(A)	8.5	4.0	4.5	25.0
A+1.0% SMLUB-E	8.5	4.0	4.5	20.0
A+1.5% SMLUB-E	9.0	5.0	4.0	17.0
A+2.0% SMLUB-E	8.5	4.0	4.5	17.0
聚磺钻井液(B)	43.5	32.0	11.5	5.2
B+1.0% SMLUB-E	52.5	40.0	12.5	4.2
B+1.5% SMLUB-E	50.0	38.0	12.0	4.0
B+2.0% SMLUB-E	52.5	40.0	12.5	4.0

从表 2 可以看出,无论是膨润土浆还是聚磺钻井液,随着 SMLUB-E 加量增大,其黏度和切力变化不大,滤失量略有降低。这说明 SMLUB-E 不会对钻井液的流变性造成不利影响,而且能提高其滤失造壁性。

2.3 SMLUB-E 的环保性能

参照国标《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750—2006)、《水质:苯并(α)芘的测定:乙酰化滤纸层析荧光分光光度法》(GB/T 11895—1989)和《海洋石油勘探开发污染物生物毒性》(GB18420.1—2009)等,测定了环保润滑剂 SMLUB-E 的重金属含量、生物毒性等环保性能。测试结果为:

1)SMLUB-E 中苯并芘含量小于 1.0 mg/L,重金属汞、镉、总铬、砷和铅的含量均小于 0.001 mg/L,都远小于标准限值,可近似认为 SMLUB-E 中不含重金属。

2)SMLUB-E 的 96 h 半数致死浓度(LC₅₀)高达 58 300 mg/L,超过海上油田废弃钻井液的一级排放标准(LC₅₀=30 000 mg/L),属于无毒油田化学剂(LC₅₀>20 000 g/mL)。

环保性能测试结果表明,SMLUB-E 具有很好的环保性能,不会对生态环境造成大的影响。

3 现场应用

环保润滑剂 SMLUB-E 目前已在塔河油田

TP154XCH 井、TP238CH 井和中良 1CX 井等深井进行了现场应用,定向钻进过程中未出现托压、卡钻等井下故障,起下钻顺畅。下面以 TP238CH 井为例,介绍 SMLUB-E 的具体应用情况。

3.1 TP238CH 井基本情况

TP238CH 井为两级井身结构侧钻水平井,套管内开窗侧钻,侧钻点选择在奥陶系桑塔木组地层,完钻层位为奥陶系一间房组。侧钻点井深 6 236.00 m,设计完钻井深 6 698.81 m,实际钻至井深 6 537.48 m(垂深 6 435.56 m)时因发生失返性漏失提前完钻,完钻井斜角 88.5°,水平位移 137.19 m。该井造斜段狗腿度较大,最大井眼曲率达到 21.0°/30m,钻具受到较高的弯曲载荷,同时小井眼(φ120.7 mm 井眼)非常容易形成岩屑床,均会导致产生较大的井下摩阻,要求钻井液具有良好的润滑降摩性能。

以往塔河油田的定向井、水平井普遍采用聚磺混油钻井液钻进。为了缓解日益增大的环保压力,TP238CH 井采用了以 SMLUB-E 为核心处理剂的不混油低摩阻钻井液 SMO-FREE,基本配方为 3.0%~4.0% 膨润土+0.1%~0.2% 提切降滤失剂 SMVIS-1+0.2%~0.3% 增黏降滤失剂 SMVIS-2+2.0%~3.0% SMP-2+2.0%~3.0% SMC+1.0%~2.0% 镶嵌成膜防塌剂 SMNA-1+1.0%~2.0% SMLUB-E+加重剂 BaSO₄,密度为 1.19~1.30 kg/L,pH 值为 9~10。

3.2 钻井液的润滑性

TP238CH 井钻进中的钻井液摩阻系数和滤饼黏滞系数随 SMLUB-E 加量的变化见表 3。

表 3 钻井过程中钻井液润滑性的变化
Table 3 Lubricity changes of drilling fluid during drilling operation

开次	井深/m	SMLUB-E加量, %	摩阻系数	滤饼黏滞系数
一开	6 239.00	0	0.33	0.140 5
	6 250.00	0	0.32	0.140 5
	6 263.00	0.25	0.30	0.052 4
	6 273.00	0.80	0.27	0.052 4
	6 304.00	1.30	0.22	0.052 4
	6 335.00	1.80	0.18	0.043 7
	6 396.00	2.00	0.14	0.043 7
	6 461.00	2.00	0.14	0.043 7
	6 467.00	2.00	0.13	0.043 7
二开	6 497.00	2.20	0.12	0.043 7
	6 531.00	2.20	0.12	0.043 7

从表3可以看出, TP238CH井钻进中的钻井液未加入 SMLUB-E 时的润滑性较差, 摩阻系数高达 0.33, 滤饼黏滞系数高达 0.140 5; 当加入 0.25% SMLUB-E 后, 滤饼黏滞系数大幅降低(降至 0.052 4), 但摩阻系数的降低幅度很小, 仅从 0.33 降至 0.30, 这说明加入 0.25% SMLUB-E 并不能有效改善钻井液的润滑性。随井斜角增大, SMLUB-E 的加量从

0.25% 逐渐提高至 2.20%, 滤饼黏滞系数趋于稳定, 始终保持在 0.043 7~0.052 4, 而摩阻系数从 0.30 逐步降至 0.12, 说明 SMLUB-E 能够增强钻井液的润滑性能。

3.3 井下摩阻情况分析

TP238CH 井钻井过程中, 摩阻随井深和井斜角的变化情况如图5所示。

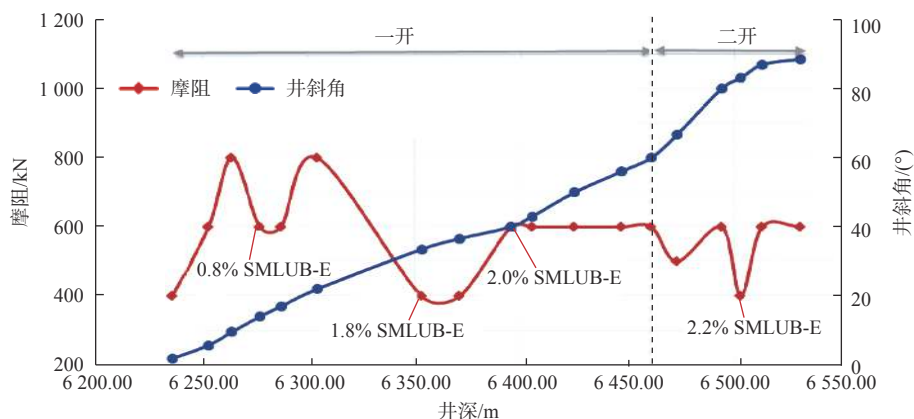


图5 摩阻随井深与井斜角的变化

Fig.5 Frictional resistance changes with the depth and deviation of the well

从图5可以看出, 一开从井深 6 236.00 m 钻至井深 6 264.00 m 的过程中, 井斜角从 1.9°增大到 9.6°, 此阶段由于钻井液中未加入润滑剂 SMLUB-E, 摩阻从初始的 400 kN 逐渐增大到 800 kN; 加入 0.80% SMLUB-E 后, 从井深 6 264.00 m 钻至井深 6 287.00 m 的过程中, 摩阻降至 600 kN 左右, 钻至井深 6 304.00 m 时, 随着井斜角进一步增大至 22°, 摩阻又开始呈现增大趋势, 增大至 800 kN, 说明此时 0.8% 的 SMLUB-E 已不足以控制摩阻; 将 SMLUB-E 加量提至 1.8% 以后, 摩阻随即降至 400 kN; 从井深 6 395.00 m 钻至井深 6 461.00 m 的过程中, 再少量补充 SMLUB-E 并将其加量控制在 2.0%, 随着井斜角从 33.5°逐渐增大到 60.0°, 摩阻也较好地控制在 500~600 kN。二开从井深 6 461.00 m 开始钻进, 由于已用套管封隔了上部井段的井壁, 开始阶段的摩阻相比一开完钻时甚至略有降低。继续少量补充 SMLUB-E 并控制其加量在 2.2% 左右, 直至钻至完钻井深摩阻都较好地控制在 400~600 kN。

通过分析 TP238CH 井钻井过程中的摩阻变化情况可知, 当钻井液中环保润滑剂 SMLUB-E 的加量保持在 2.0% 左右时, 能够将摩阻控制在较低值, 相比采用传统混油钻井液的水平井摩阻(80~100 kN)降低约 30% 以上, 证明 SMLUB-E 具有优异

的润滑性能。

4 结 论

1) 选用工业废植物油中的脂肪酸、有机多元醇等作为基础原料, 合成了钻井液环保润滑剂 SMLUB-E。

2) 室内试验分析表明, SMLUB-E 在水基钻井液中具有良好的润滑效果, 润滑膜强度高, 耐温 160 ℃, 不含重金属, 无毒, 环保性能好。

3) 以 SMLUB-E 为核心处理剂的不混油低摩阻钻井液 SMO-FREE, 在塔河油田深层水平井定向钻进时进行了应用, 未出现托压、卡钻等井下故障。现场应用表明, 当钻井液中 SMLUB-E 加量保持在 2.0% 左右时, 井下摩阻能够控制在 400~600 kN, 表现出良好的润滑降摩阻性能。

参 考 文 献

References

- [1] ESPAGNE B J L, LAMRANI-KERN S, RODESCHINI H. Biodegradable lubricating composition and use thereof in a drilling fluid, in particular for very deep reservoirs: US 8846583[P]. 2014-09-30[2018-10-28].
- [2] 杨芳. 纳米碳耐高温钻井液润滑剂的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
YANG Fang. Study of nanosize carbon spheres as high temperature

- drilling fluid lubricant[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [3] KNOTHE G, STEIDLEY K R. Lubricity of components of biodiesel and petrodiesel: the origin of biodiesel lubricity[J]. *Energy & Fuels*, 2005, 19(3): 1192–1200.
- [4] NGUYEN D, STEVENSON D, ROHR B. Lubricant additives for wellbore or subterranean drilling fluids or muds: US20150218433[P]. 2015-08-06[2018-10-28].
- [5] BORUGADDA V B, GOUD V V. Improved thermo-oxidative stability of structurally modified waste cooking oil methyl esters for bio-lubricant application[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 112(5): 4515–4524.
- [6] MASSEY F P, MASSEY O N. Lubrication for drilling fluid: US9598625[P]. 2017-03-21[2018-10-28].
- [7] 刘保双, 唐代绪. 一种钻井液用白油润滑剂 HML 的研究 [J]. *天然气工业*, 2002, 22(4): 48–49.
LIU Baoshuang, TANG Daixu. Study on a new type drilling fluids with white oil lubricant HML[J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(4): 48–49.
- [8] RUARK G A, PIKE R W. Synergistic bead lubricant and methods for providing improved lubrication to drilling fluids for horizontal drilling: US8324136[P]. 2012-12-04[2018-10-28].
- [9] 霍胜军, 贾万瑾, 张萍, 等. 一种新型钻井液用液体润滑剂性能研究 [J]. *石油钻采工艺*, 2007, 29(增刊 1): 40–42.
LEI Shengjun, JIA Wanjin, ZHANG Ping, et al. Research on performance of a new liquid lubricate for drilling fluid[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2007, 29(supplement 1): 40–42.
- [10] 袁建强, 王越之, 罗春芝. JMR 聚醚润滑剂的研制与应用 [J]. *石油钻探技术*, 2005, 33(3): 31–32.
YUAN Jianqiang, WANG Yuezhi, LUO Chunzhi. Development and application of water base lubricant-JMR[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2005, 33(3): 31–32.
- [11] 孙启忠, 胥洪彪, 刘传情, 等. 聚合醚润滑剂 HLX 的研究及应用 [J]. *石油钻探技术*, 2003, 31(1): 42–43.
SUN Qizhong, XU Hongbiao, LIU Chuanqing, et al. Study and application of the polyether lubricant HLX[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2003, 31(1): 42–43.
- [12] 薛玉志, 蓝强, 李公让, 等. 超低渗透钻井液体系及性能研究 [J]. *石油钻探技术*, 2009, 37(1): 46–52.
XUE Yuzhi, LAN Qiang, LI Gongrang, et al. Ultra-low permeable drilling fluid and its performance[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2009, 37(1): 46–52.
- [13] 何竹梅, 薛芸, 曾甘林, 等. 石蜡乳液润滑剂在江苏油田钻井中的应用 [J]. *石油钻探技术*, 2010, 38(3).
HE Zhumei, XUE Yun, ZENG Ganlin, et al. Application of wax emulsion lubricants in drilling operations in Jiangsu Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2010, 38(3).
- [14] 黄贤杰. 塔河油田 TK636H 超深水平井钻井液技术应用 [J]. *西部探矿工程*, 2007, 19(7): 59–61.
HUANG Xianjie. Ultra deep horizontal well drilling fluid technology of Well TK636H in Tahe Oilfield[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2007, 19(7): 59–61.
- [15] AMANULLAH M, BUBSHAIT A S, FUWAIRE O A. Eco-friendly lubricating additives for water-based wellbore drilling fluids: US9834718[P]. 2017-12-05[2018-10-28].
- [16] KANIA D, YUNUS R, OMAR R, et al. A review of biolubricants in drilling fluids: recent research, performance, and applications[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2015, 135: 177–184.
- [17] 王伟吉, 邱正松, 钟汉毅, 等. 钻井液用新型纳米润滑剂 SD-NR 的制备及特性 [J]. *断块油气田*, 2016, 23(1): 113–116.
WANG Weiji, QIU Zhengsong, ZHONG Hanyi, et al. Preparation and properties of nanoparticle-based lubricant SD-NR for drilling fluids[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2016, 23(1): 113–116.
- [18] 董兵强, 邱正松, 邓智, 等. 钻井液用微乳液润滑剂 NE 的研究与应用 [J]. *钻井液与完井液*, 2018, 35(3): 54–59.
DONG Bingqiang, QIU Zhengsong, DENG Zhi, et al. Study and application of a drilling fluid microemulsion lubricant NE[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2018, 35(3): 54–59.
- [19] 李小微, 张宇, 景晓琴, 等. 一种高性能环保型钻井液润滑剂的研究与应用 [J]. *钻井液与完井液*, 2018, 35(4): 46–50.
LI Xiaorui, ZHANG Yu, JING Xiaoqin, et al. Evaluation and application of the high performance environmentally friendly drilling fluid lubricant HPRH[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2018, 35(4): 46–50.
- [20] 宣扬, 钱晓琳, 林永学, 等. 水基钻井液润滑剂研究进展及发展趋势 [J]. *油田化学*, 2017, 34(4): 721–726.
XUAN Yang, QIAN Xiaolin, LIN Yongxue, et al. Research progress and development trend on environmental-friendly lubricant in water-based drilling fluid[J]. *Oilfield Chemistry*, 2017, 34(4): 721–726.
- [21] 李建山. 杭锦旗区块防塌防漏钻井液技术 [J]. *钻井液与完井液*, 2019, 36(3): 308–314.
LI Jianshan. Drilling fluid technology for borehole wall stabilization and mud loss control in Block Hangjinqi[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019, 36(3): 308–314.

[编辑 令文学]