

文章编号:1673-5005(2019)03-0107-06

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2019.03.012

改性脂肪酸提切剂的研制及其应用

黄贤斌^{1,2}, 孙金声^{1,2}, 蒋官澄³, 吕开河^{1,2}, 王金堂^{1,2}, 刘敬平^{1,2}, 罗少杰⁴

(1. 非常规油气开发教育部重点实验室, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 3. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 4. 中国石油吉林油田分公司, 吉林松原 138000)

摘要:合成一种可在油基钻井液中代替有机土的改性脂肪酸提切剂,测定提切剂对乳液流变性能的影响,分析乳液样品的三段式触变性,使用冷冻电镜观察提切剂对乳液微观结构的影响,采用界面流变仪分析提切剂对油水界面流变性的影响,分析提切剂的作用机制,在油基钻井液中进行适用性评价。结果表明:提切剂有利于提高乳液黏度尤其是低剪切速率黏度;加入提切剂后,乳液具有优良的触变性,并观测到蜂窝状结构;提切剂能够显著增强油水界面弹性模量和界面膜强度,有利于乳液稳定;提切剂吸附在油水界面,通过氢键作用在乳液中构建三维网架结构,从而增强弱凝胶结构和提高切力;与含有机土的油基钻井液相比,使用提切剂的无土相油基钻井液具有较优异的流变结构与电稳定性。

关键词:提切剂; 改性脂肪酸; 弱凝胶; 无土相; 油基钻井液

中图分类号:TE 254 **文献标志码:**A

引用格式:黄贤斌,孙金声,蒋官澄,等. 改性脂肪酸提切剂的研制及其应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019,43(3):107-112.

HUANG Xianbin, SUN Jinsheng, JIANG Guancheng, et al. Synthesis of a modified fatty acid as rheology modifier and its application[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(3):107-112.

Synthesis of a modified fatty acid as rheology modifier and its application

HUANG Xianbin^{1,2}, SUN Jinsheng^{1,2}, JIANG Guancheng³, LÜ Kaihe^{1,2},
WANG Jintang^{1,2}, LIU Jingping^{1,2}, LUO Shaojie⁴

1. Key Laboratory of Unconventional Oil & Gas Development, Ministry of Education, Qingdao 266580, China;
2. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
3. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
4. PetroChina Jilin Oilfield Company, Songyuan 138000, China)

Abstract: A modified fatty acid (MFA) as the rheology modifier was synthesized which can replace organoclay in oil based drilling fluid (OBM). The influence of MFA on the rheological properties of the emulsions was investigated and three-interval thixotropy was analyzed. The effect of MFA on the microstructure of the emulsion was studied by Cryo-scanning electron microscope (cryo-SEM). And the influence of MFA on oil-water interfacial rheology was characterized by the interfacial rheometer, through which the function mechanism of MFA was analyzed. Also, the applicability of MFA in the high-density OBM was evaluated. It is found that MFA could enhance the emulsion viscosity especially the low-shear-rate viscosity. Emulsions containing MFA present good thixotropic property and a honeycomb structure could be observed. MFA could considerably im-

收稿日期:2018-12-03

基金项目:石油化工联合基金(A类)重点基金项目(U1762212);中国博士后科学基金项目(2018M630812);中央高校基本科研业务费专项(18CX02171A);中国石油大学(华东)人才引进项目(YJ20170014);青岛市创业创新领军人才计划项目(18-1-2-15-zhc);中国石油与天然气集团公司课题项目(2018A-3907)

作者简介:黄贤斌(1988-),男,讲师,博士,研究方向为钻井液和储层保护。E-mail: 20170092@upc.edu.cn.

通信作者:孙金声(1965-),男,中国工程院院士,俄罗斯科学院院士,教授级高级工程师,博士,研究方向为油气井工程钻井液与储层保护技术。E-mail:sunjinsheng1965@sina.com.

prove the storage modules of oil/water interfaces and interfacial film strength, which is favorable for the emulsion stability. And MFA adsorbs at the oil-water interfaces, which establishes a three-dimensional network structure in the water-in-oil emulsions through hydrogen bonding. In this way, the “weak gel” structure and gel strength of the emulsions are enhanced. Compared with OBMs containing the organoclay, organoclay-free OBMs using MFA show superior rheological performance and larger electrical stability.

Keywords: rheology modifier; modified fatty acid; weak gel; organoclay-free; oil based drilling fluid

与水基钻井液相比,油基钻井液具有较为优异的抗高温、抑制、润滑等性能^[1-2]。传统的油基钻井液使用有机土^[3]作为提切剂。有机土是通过长链季铵盐与膨润土反应制备的^[4-5],通过在油相中分散与膨胀起到增黏提切的作用。基于有机土的油基钻井液有以下缺点:①有机土是一种亚微米级的胶质颗粒^[6],有机土含量高的油基钻井液虽可获得较高的切力,但是黏度较高、高温老化后增稠严重,对钻速有负面的影响^[7-8];②常用的低有机土含量的油基钻井液(或低胶质油基钻井液)会降低钻井液的流变性,导致钻井液切力过低^[9],不能有效悬浮和携带钻屑。上述问题在水平井、大位移井等井型中尤为突出,携岩性能不足可能会在井筒中形成岩屑床^[10-11],影响钻井作业。笔者合成一种可以代替有机土的改性脂肪酸类油基钻井液提切剂,通过测定流变曲线研究提切剂对黏度的影响;通过测定乳液的微观结构和触变性能,表征其弱凝胶结构;结合界面流变性实验提出提切剂通过增强水滴之间作用力在乳液中形成三维网架结构来提切的机制。在钻井液体系中评价提切剂对油基钻井液切力和其他性能的影响。

1 实验

1.1 实验仪器与试剂

实验仪器:FJ200-SH 高速均质机,上海始恒仪器设备有限公司;Physica MCR301 型流变仪,奥地利安东帕;AR-G2 型界面流变仪,美国 TA;冷冻扫描电镜,S-4300 型,日本 Hitachi;Fann23D 型破乳电压测试仪,美国 FANN;ZNN-D6B 型电动六速黏度计,SD4 型常温常压滤失仪,71-A 型高温高压失水仪,GW300 型滚子加热炉,均购于青岛同春石油仪器有限公司;电子天平,感量 0.001 g。

实验试剂:高纯二聚酸,二元酸,质量分数高于 98%,江西艾图瑞克公司;乙二醇胺,AR,高纯白油(25 °C 密度为 0.88 g/cm,20 °C 黏度为 244 mPa·s),北京百灵威科技有限公司;5# 白油,茂名石化,用于钻井液的配制;油基钻井液添加剂,哈里伯顿公司;加重剂重晶石,四川正蓉公司。

1.2 实验方法

1.2.1 提切剂的合成

使用高纯二聚酸与乙二醇胺在 170 °C 条件下反应来制备提切剂。将干燥的圆底三口烧瓶放置在铁架台上,安装好机械搅拌机、除水器和氮气接口。然后将二聚酸、乙二醇胺按物质的量比 1 : 2.05 加入到三口烧瓶中。反应前通氮气 10 min。将三口烧瓶放置于油浴锅中,并升温至 170 °C。反应时间为 4 h。搅拌速度为 250 r/min。反应结束后,将产物冷却至室温。实验中直接使用合成后的产品,没有经过提纯处理。产物的合成过程如图 1 所示。

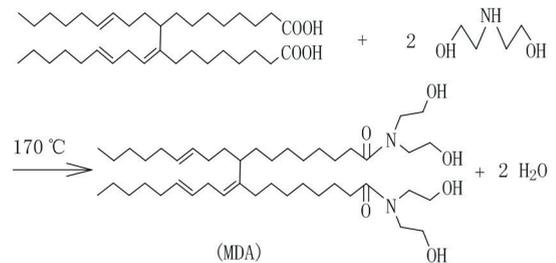


图 1 提切剂的合成过程

Fig.1 Synthesis process of rheology modifier

1.2.2 基液的配制及表征

基液的配制:将 3 g Span80 加入到 80 mL 白油中,搅拌均匀后加入不同量的提切剂,在 300 r/min 条件下低速搅拌 24 h 使其充分溶解,配制成提切剂/Span80/白油溶液。在油溶液中分别加入 20 mL 蒸馏水,使用高速均质机在 5 000 r/min 转速下搅拌 5 min 配制成乳液基液。

流变曲线测试:使用 Physica MCR301 型流变仪对不同提切剂加量的乳液样品的黏度进行测定。实验使用平板转子,狭缝间距为 0.047 mm。剪切速率范围为:0.1 ~ 200 s⁻¹,测试在 (25.0 ± 0.1) °C 条件下进行。

三段式触变性测试:使用 Physica MCR301 型流变仪和平板转子测定乳液样品的“静止-破坏-静止”三段式触变性。首先对乳液样品进行 2 min 低速剪切(5.11 s⁻¹),然后进行 2 min 高速剪切(170 s⁻¹),最后再次进行 2 min 低速剪切(5.11 s⁻¹)。测

试温度为(25.0±0.1)℃。

界面剪切流变测试:使用美国TA公司的AR-G2型流变仪测试加入提切剂前后,油水界面的弹性模量和黏性模量随时间的变化。实验使用双臂环(double wall ring)界面流变测试单元^[12-13],该双臂环材质为铂铱合金,直径为35 mm。测试前使用火焰灼烧来清理双臂环上的有机污染物。实验过程中首先在样品杯下部注入19.2 mL去离子水,将双臂环调节至水/气界面上,然后缓慢将15 mL油溶液滴在去离子水上部,从而保证双臂环在处于油水界面上。实验选取恒定频率为0.5 Hz,应变幅度为0.5%(线性黏弹性区域内)。测试温度为(25.0±0.1)℃。

冷冻扫描电镜(cryo-SEM):冷冻电镜技术^[14]能够观察加入提切剂之后乳液微观结构的变化。将一小滴乳液样品滴加到样品座上并迅速沉浸于超低温液氮(低于-135℃)中。2 min后将样品转入高真空冷冻环境中,将样品冷冻断裂漏出新鲜断面并喷金。最后将样品冷冻传输至扫描电镜中,在超低温下(低于-135℃)下观察样品的断面。

1.2.3 提切剂在油基钻井液体系中的性能

使用以下处理剂来配制不同密度的白油基钻井液体系:VGPLUS(有机土,流型调节剂)、FACTANT(主乳化剂)、EZ-MUL(辅乳化剂)、ADAPTA(聚合物降滤失剂)、VERSACOAT(润湿剂)。钻井液使用的基础油为茂名石化生产的5#白油。根据最新的国家标准^[15]来测定油基钻井液的流变和滤失等性能。然后将配制的油基钻井液高温老化16 h,再次参照上述标准测定油基钻井液的性能。

2 结果分析

2.1 提切剂加量对基液黏度的影响

图2是不同提切剂加量条件下,乳液基液黏度与剪切速率的关系。对于加入提切剂的乳液样品,随着剪切速率的增加黏度显著减小,表明这些乳液具有优异的剪切稀释的非牛顿流体特性。当提切剂质量浓度为0~3 g/L时,乳液黏度随提切剂加量逐渐增大,当其质量浓度继续增加黏度不再变化。当剪切速率较小时,相对于没有提切剂的空白样品,加入提切剂后黏度增加明显,各个乳液样品的黏度相差较大。随着剪切速率增大,乳液的黏度差逐渐减小。这说明提切剂更有利于增加低剪切速率黏度。乳液的这种结构可认为是一种易碎的弱凝胶结构^[16],当剪切速率较低时,乳液具有较强的凝胶结构,有利于携岩;当剪切速率较高时,乳液的凝胶结

构被打破,有利于降低阻力,提高钻速。

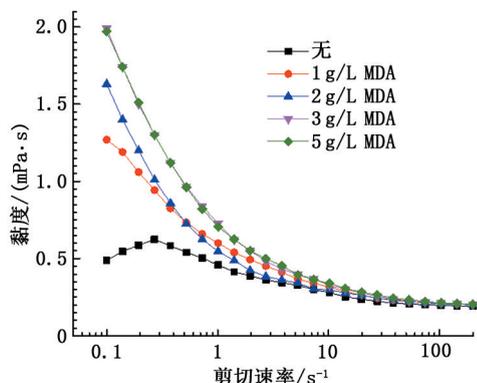


图2 不同提切剂加量条件下乳液样品的流变曲线

Fig.2 Rheology plots of emulsion samples with various MDA concentrations

2.2 乳液弱凝胶结构表征

从触变性和微观结构两个方面来研究乳液的弱凝胶结构。

2.2.1 触变性

良好触变性是弱凝胶结构的体现。图3为不同提切剂加量条件下乳液样品的三段式触变曲线。由图3可见,低剪切速率下乳液黏度较高,较高剪切速率下乳液黏度迅速降低,再次施加低剪切后乳液黏度恢复较快。所以加入提切剂的乳液样品具有较好的触变性能,能够满足钻井工程对钻井液流变性的需要。此外,良好的触变性能对于降低钻井液当量循环密度(ECD)及其引起的井壁失稳等钻井事故具有重要的作用。

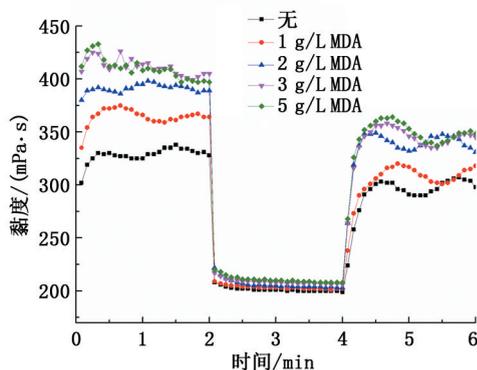


图3 不同提切剂加量条件下乳液样品的三段式触变曲线

Fig.3 Three interval thixotropy test results of emulsion samples with various MDA concentrations

2.2.2 微观形貌

通过对比纯乳液和含有2 g/L提切剂乳液的微观结构来分析乳液弱凝胶结构和提切机制。利用冷冻扫描电镜直观观察乳液的结构,实验结果见图4。

图4(a)为纯乳液的冷冻电镜照片,图4(b)~(d)为提切剂质量浓度为2 g/L的乳液,并来自同一个断面。由图4可以看出,图4(a)和图4(b)具有相似的结构,但是图4(b)乳液的粒径较大。在电镜观察过程中,由于油和水易升华并且水分更容易升华,从而观察到了图4(c)和图4(d)中所示的连续相的蜂窝状结构。图4(c)中的孔洞是水滴(红色“W”)的位置。然而,在纯乳液中没有观察到类似的结构。蜂窝状结构意味着乳液中“凝胶状”结构的存在^[17]。弱凝胶结构一方面能够增加乳液的结构力有利于增加切力^[18-19],另一方面阻碍了内相液滴的移动有利于乳液稳定。

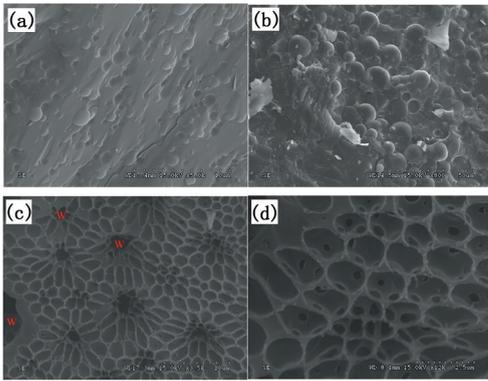


图4 冷冻扫描电镜

Fig. 4 Cryo-SEM images of pure emulsion

2.3 提切剂作用机制

合成的提切剂具有亲水和疏水基团,可认为是表面活性物质。当形成油包水乳状液后,提切剂倾向于吸附在油水界面上。实验表明提切剂难以溶于水和白油,但是可以少量溶解在含 Span80 的白油溶液中。随着乳化剂 Span80 在油水界面上的吸附,使得提切剂在界面上的质量浓度升高。以上两种作用促使提切剂在油水界面处的质量浓度高于油相中的质量浓度,会在界面上形成膜。

界面流变性实验是表征界面膜强度的一种方式。图5为在恒定频率下不同油溶液与去离子水之间界面弹性模量(G')和界面黏性模量(G'')随时间的变化曲线。可以看出:对于纯白油,界面黏性模量始终远大于弹性模量,界面膜偏向于“液态”(liquid-like);对于含有3% Span 的白油溶液,界面流变性由黏性向弹性转变,约650 s时黏性和弹性达到平衡,之后以弹性为主;加入2 g/L 提切剂后,进一步提高了油水界面的弹性模量,使界面膜更偏向于“固态”(solid-like),膜强度增大,界面油水难以混融,有利于乳液稳定。

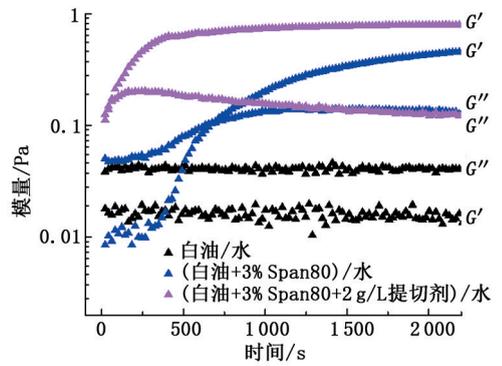


图5 样品界面弹性模量和黏性模量与时间的关系

Fig. 5 Relationship between storage modulus, loss modulus and time for samples

界面膜强度的增加间接证明了提切剂在油水界面的吸附。在乳液中,吸附在不同水滴表面的提切剂之间存在氢键作用,增强了水滴之间的相互作用,从而在乳液中构建一个弱相互作用连接的三维网络结构,形成了弱凝胶结构^[20],增强乳液的结构力,从而达到提切的作用。

2.4 在油基钻井液体系中的应用

2.4.1 加量对动切力及静切力的影响

配制以下油基钻井液体系:OWR(5#白油:30% $CaCl_2$ 溶液=80:20)+2% 主乳化剂+3% 辅乳化剂+提切剂 MDA+1% 润湿剂+3% CaO +2% 聚合物降滤失剂+重晶石(加重至 $2.2 g/cm^3$)。

考察提切剂加量对上述无土相油基钻井液动切力和静切力的影响,结果见图6。由图6可见,在提切剂质量浓度为0~3 g/L内,无土相油基钻井液的动切力与静切力均逐渐增加,当提切剂质量浓度大于3 g/L时,动切力与静切力均逐渐减小。这与流变曲线结论基本一致。

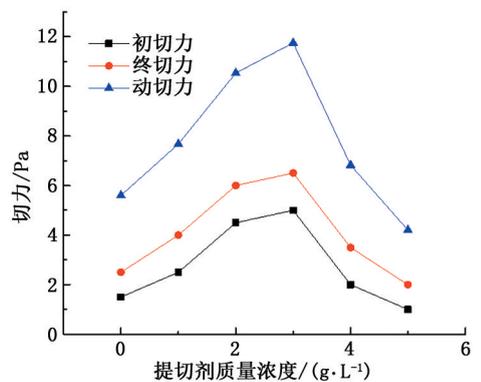


图6 提切剂浓度对钻井液切力的影响

Fig. 6 Effect of MDA concentration on yield point and gel strength of drilling fluid

2.4.2 与传统油基钻井液性能的对比

无土相油基钻井液配方:

OWR(5[#]白油:30% CaCl₂ 溶液=80:20)+2% 主乳化剂+3% 辅乳化剂+3 g/L 提切剂 MDA+1% 润湿剂+3% CaO+2% 聚合物降滤失剂+重晶石(加重至 2.2 g/cm³)。

传统的含有机土的油基钻井液配方:

OWR(5[#]白油:30% CaCl₂ 溶液=80:20)+2% 主乳化剂+3% 辅乳化剂+1.0% 有机土+1% 润湿剂+3% CaO+2% 聚合物降滤失剂+重晶石(加重至 2.2 g/cm³)。

配制上述钻井液配方,老化前后基本性能见表 1。与常规含有机土的油基钻井液相比,无土相油基钻井液的优点包括:

(1)相同密度,无土相油基钻井液表观黏度较小。一方面有利于机械钻速的提高,另一方面无土

相油基钻井液可以加重至较高的密度而不失去流动性。

(2)无土相油基钻井液切力结构优异,由于钻井液具有弱凝胶结构,较低塑性黏度下仍可以达到较高的动塑比。

(3)通过调节提切剂的加量可以调整动切力值,来满足不同类型钻井液的需求。将提切剂加量从 0.30% 降低至 0.10% 时,动切力有明显的降低。用于携岩的钻井液(或称为清洁井眼的钻井液),一般要求有较高的动切力,通常用于定向井、水平井等对携岩要求较高的井段。但对于小井眼或者是窄安全密度窗口的地层,钻井液的动切力不能太高,来避免压力波动过大^[21]以及可能造成的井漏等井下复杂事故。

(4)无土相配方不含有机土,可以进一步提高油基钻井液的储层保护性能。

表 1 传统油基钻井液与无土相油基钻井液的配方与性能

Table 1 Formulations and properties of a conventional OBM and an organoclay-free OBM

类别	条件	表观黏度 AV/ (mPa·s)	塑性黏度 PV/ (mPa·s)	动切力 YP/Pa	YP/PV	静切力 Gel/Pa	高温高压 滤失量 FL _{HTHP} /mL	电稳定性 ES/V
传统油基	老化前	88.5	82	6.643	0.081	2.5/4.0		761
	老化后(180 °C×16 h)	79.5	74	5.621	0.076	2.5/3.5	8.4	457
无土相 (0.30%)	老化前	57.5	46	11.75	0.256	5.0/6.5		1577
	老化后(180 °C×16 h)	53.5	43	10.73	0.250	4.5/5.5	4.4	835
无土相 (0.10%)	老化前	52.5	45	7.67	0.170	2.5/4.0		1352
	老化后(180 °C×16 h)	48.5	42	6.64	0.158	2.5/4.0	6.2	596

注:高温高压滤失量是在 180 °C, 3.5 MPa 压差条件下测定的;静切力表示为初切/终切。

3 结 论

(1)利用高纯二聚酸与二乙醇胺合成了一种改性脂肪酸类提切剂 MDA。加入提切剂后,乳液形成了蜂窝状的弱凝胶结构,具有良好的触变性。低剪切速率下乳液黏度较高,随剪切速率增加乳液黏度迅速降低,再次施加低剪切后乳液黏度恢复较快。

(2)提切剂吸附在油水界面形成较强的界面膜,有利于乳液稳定。乳液中不同水滴界面膜之间存在氢键作用力,可以在乳液中形成弱凝胶三维网架结构,从而达到提切的作用。

(3)与传统的含有机土的油基钻井液相比,使用提切剂的无土相油基钻井液可以获得较优异的流变结构。

参考文献:

[1] 冯萍,邱正松,曹杰,等. 提切剂对合成基钻井液流变性的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012,36(6):172-176.

FENG Ping, QIU Zhengsong, CAO Jie, et al. Effects of rheological modifiers on rheological characteristics of synthetic base drilling fluid [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012,36(6): 172-176.

[2] 高建申,孙建孟,姜艳娇,等. 油基钻井液环境下电成像测井响应分析及定量反演[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(3):50-56.

GAO Jianshen, SUN Jianmeng, JIANG Yanjiao, et al. Response analysis and quantitative inversion of electrical imaging logging in oil based drilling fluid environment [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018,42(3):50-56.

[3] JONES T R. The properties and uses of clays which swell in organic solvents [J]. Clay Minerals, 1983,18(4): 399-401.

[4] DE PAIVA L B, MORALES A R, DÍAZ F R V. Organoclay: properties, preparation and applications [J]. Applied Clay Science, 2008,42(1/2):8-24.

[5] 霍锦华,张瑞,杨磊. CTAB 诱导膨润土乳液转相机制

- 及其在可逆乳化油基钻井液中的应用[J]. 石油学报, 2018, 39(1):122-128.
- HUO Jinhua, ZHANG Rui, YANG Lei. Phase transition mechanism of CATB inducing bentonite emulsion and its application in reversible emulsification oil-based drilling fluids[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(1):122-128.
- [6] SILVA I A, COSTA J M R, MENEZES R R, et al. Studies of new occurrences of bentonite clays in the State of Paraíba for use in water based drilling fluids[J]. *Revista Escola de Minas*, 2013, 66(4):485-491.
- [7] CAENN R, DARLEY H C H, GRAY G R. Composition and properties of drilling and completion fluids[M]. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2011:63-73.
- [8] FARD S. Evaluation of fine particles removal from invert emulsion drilling fluid by novel[D]. Calgary: University of Calgary, 2015.
- [9] 崔明磊. 油基钻井液性能优化研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.
- CUI Minglei. Research on oil based drilling fluid performance optimization[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2011.
- [10] 董长银, 高凯歌, 王鹏, 等. 低黏液体井筒携砂流动规律及特征流速实验[J]. 石油学报, 2016, 37(10):1280-1286.
- DONG Changyin, GAO Kaige, WANG Peng, et al. Sand-carrying follow in low-viscosity wellbore fluid and characteristic flow velocities[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(10):1280-1286.
- [11] YANG Xiaoguang, LIU Gonghui, LI Jun. Application of a special technique for controlling the cutting bed height in gas drilling of horizontal wells[J]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2015, 50(6):508-515.
- [12] VANDEBRIL S, FRANCK A, FULLER G G, et al. A double wall-ring geometry for interfacial shear rheometry[J]. *Rheologica Acta*, 2010, 49(2):131-144.
- [13] LI Z, HARBOTTLE D, PENSINI E, et al. Fundamental study of emulsions stabilized by soft and rigid particles[J]. *Langmuir*, 2015, 31(23):6282-6288.
- [14] MIKULA R J, MUNOZ V A. Characterization of emulsions and suspensions in the petroleum industry using cryo-SEM and CLSM[J]. *Colloids & Surfaces A: Physicochemical & Engineering Aspects*, 2000, 174(1):23-36.
- [15] GBT 16783. 2-2012 石油天然气工业[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [16] BELL S A, SHUMWAY W W. Additives for imparting fragile progressive gel structure and controlled temporary viscosity to oil based drilling fluids; US7560418[P]. 2009-07-14.
- [17] KIM J Y, SONG J Y, LEE E J, et al. Rheological properties and microstructures of Carbopol gel network system[J]. *Colloid and Polymer Science*, 2003, 281(7):614-623.
- [18] 王荐, 张荣, 聂明顺, 等. HRD弱凝胶钻井完井液研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2008, 25(6):6-7.
- WANG Jian, ZHANG Rong, NIE Mingshun, et al. The study and application of the HRD weak-gel drill-in fluid[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2008, 25(6):6-7.
- [19] 张现斌, 赵冲, 王伟忠, 等. 矿物油基钻井液低剪切流变行为调节技术研究[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(4):63-70.
- ZHANG Xianbin, ZHAO Chong, WANG Weizhong, et al. Technologies to modify low-shear rate rheology behaviors of mineral oil based drilling fluids[J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(4):63-70.
- [20] 冯萍, 邱正松, 曹杰, 等. 国外油基钻井液提切剂的研究与应用进展[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(5):84-88.
- FENG Ping, QIU Zhengsong, CAO Jie, et al. Progress on study and application on rheology modifier for oil-based mud abroad[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2012, 29(5):84-88.
- [21] 李新. 考虑岩屑床影响的井内波动压力研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- LI Xin. Research on swab and surge pressure in the well considering cutting bed[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.

(编辑 刘为清)