

文章编号:1000-4092(2022)04-651-07

# 纳米乳液渗吸驱油剂性能评价与应用\*

丁小惠<sup>1</sup>, 周丹<sup>2</sup>, 吴凯<sup>3</sup>, 李栓<sup>1</sup>, 贺勇<sup>2</sup>, 余波<sup>2</sup>, 陈丽<sup>1</sup>

(1. 捷贝通石油技术集团股份有限公司, 四川 成都 610015; 2. 新疆油田分公司百口泉采油厂, 新疆 克拉玛依 834000; 3. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司井下作业公司, 四川 成都 610051)

**摘要:**为适应低渗透油藏提高采收率的需求,以双子表面活性剂双烷基酚酮聚氧乙烯醚为主要原料制备了一种新型纳米乳液作为驱油剂。室内评价了其界面性能、润湿性能、耐温抗盐性能等,并通过核磁共振、相渗实验及自发渗吸实验考察了该纳米乳液驱油剂的驱油效果,同时与常规驱油剂磺酸盐表面活性剂进行了对比。结果表明,该纳米驱油剂乳液的平均粒径为60 nm。随纳米驱油剂加量增加,溶液表面张力和油水界面张力逐渐下降。驱油剂加量为0.2%时,油水界面张力可达 $2.94 \times 10^{-3}$  mN/m,界面活性良好。纳米驱油剂可使岩心表面由亲油性转变为亲水性,实现润湿反转。纳米驱油剂加量为0.2%时,对原油的乳化效率为98%,其耐温抗盐性能良好,静态渗吸驱油可提高采收率30百分点。在新疆油田压裂驱油和老井注水吞吐的应用表明,纳米渗吸驱油技术的增产效果好于常规驱油技术,在产液量相差不大的情况下,返排率更低,产油量更高,驱油置换增油效果更好。

**关键词:**纳米乳液;渗吸;驱油剂;表面活性剂;提高采收率

文献标识码:A DOI:10.19346/j.cnki.1000-4092.2022.04.013

中图分类号:TE357.46

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



低渗透油藏具有岩石埋藏致密、渗透性差等特点,在体积压裂后,随着开采时间的延长,油气层本身的能量不断消耗,压力不断下降,使产量大幅降低,甚至停产,导致储层中存在大量的残余油<sup>[1]</sup>。如何开采出剩余油,是进一步提高采收率的瓶颈。化学驱是提高采收率的重要方法。在常规油藏中,聚合物和表面活性剂强化采油(EOR)的效果已被广泛证实<sup>[2-6]</sup>。然而,由于低渗透油藏孔喉尺寸小、渗流能力差,聚合物长链分子在通过低孔喉半径的多孔介质时容易发生断裂,从而限制了聚合物在低渗透储层中的应用<sup>[7]</sup>。因此,表面活性剂驱是低渗透油藏提高采收率较有潜力的方法之一。

乳化作用是表面活性剂驱油的重要机制之一。表面活性剂具有低油水表/界面张力,可以将原

油从岩石表面剥离并提高采收率<sup>[8]</sup>。近几十年来,研究人员开始使用表面活性剂来制备具有良好采收率效果的乳液型驱油剂<sup>[9-10]</sup>。但由于乳液粒径大、吸附损失大,使得乳液驱在低渗透油藏中的应用并不经济。另一种方法是开发粒径小,易进入微小孔喉的纳米流体。Youssif等<sup>[11]</sup>研究了平均粒径为22 nm的亲水单分散二氧化硅纳米颗粒驱油对采收率的影响。采用0.1%二氧化硅纳米流体三次采出技术后再用水驱二次采出技术,采收率提高了13.28%。然而,普通的纳米驱油颗粒很难提高驱油效率。因此,亟需研发一种适用于低渗透油藏、粒径小且驱油效率高的驱油体系。本文使用有机溶剂、双子表面活性剂以及水相组成的新配方,复配制得了纳米乳液渗吸驱油剂,优化了纳米乳液渗吸驱

\* 收稿日期:2021-11-22;修回日期:2022-03-23。

作者简介:丁小惠(1989—),女,工程师,四川农业大学环境工程专业硕士(2014),研究方向为油田化学,E-mail:dingxiaohui@gepetto-oil.com。李栓(1987—),男,工程师,本文通讯联系人,河北科技大学应用化学专业硕士(2013),研究方向为油田化学,通讯地址:610000 四川省成都市锦江区天紫界商业大厦13楼1318室,E-mail:lishuan@gepetto-oil.com。

油剂体系的加量,并与常规的驱油剂性能进行了对比。

## 1 实验部分

### 1.1 材料与仪器

纳米乳液渗吸驱油剂(GPNR-2),由有机溶剂、双子表面活性剂双烷基酚酮聚氧乙烯醚以及水相复配制得,其中双子表面活性剂质量分数为20%~30%,自制<sup>[23]</sup>;新疆油田X区块注入水,矿化度为8724 mg/L、钙镁离子含量为550 mg/L;原油,黏度为0.7 mPa·s、密度为0.732 g/cm<sup>3</sup>;天然岩心;磺酸盐表面活性剂,新疆某油田提供;甲基硅油,分析纯,成都市科龙化工试剂厂;纯净水;采用氯化钠配制不同矿化度的盐水;采用氯化钙、氯化镁配制不同钙镁离子含量的盐水。

TX-500C<sup>+</sup>旋转滴界面张力仪,美国科诺工业有限公司;气体孔渗联测仪、岩心饱和仪、LDY-70/180型高温高压流体敏感性损害评价仪,海安县石油科研仪器有限公司;NS-90Z纳米粒度及电位分析仪,珠海欧美克仪器有限公司;JCY-1接触角测量仪,上海方瑞仪器有限公司;MacroMR12-150HTHP-I三维核磁过程成像分析及流动实验分析仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;赛多利斯BSA224S分析天平,广州市深华生物技术有限公司;JYW-200C表面张力仪,承德鼎盛试验机检测设备有限公司;S212电子恒速搅拌器,上海申顺生物科技有限公司。

### 1.2 实验方法

#### (1)粒径分析

用纳米粒度仪测定纳米乳液渗吸驱油剂的粒度分布。

#### (2)油水表/界面张力的测定

用注入水配制不同质量分数的驱油剂溶液,参照石油天然气行业标准SY/T 5370—2018《表面及界面张力测定方法》,测定纳米乳液驱油剂溶液的表面张力及其与原油间的界面张力,取界面张力的平衡值。

#### (3)性能评价

润湿性能。用甲基硅油涂抹浸泡载玻片,烘干后使载玻片表面形成油膜,将载玻片原始的亲水性变为亲油性。0.2%纳米乳液渗吸驱油剂与亲油基板经过一定时间的作用,采用接触角测量仪测定0.2%纳米乳液在玻璃基板表面的接触角变化。

吸附性能。用注入水配制质量分数为0.15%~0.3%的纳米乳液渗吸驱油剂溶液。将岩心通过洗油处理、晾干粉碎,取0.25~0.15 mm(60~100目)岩心粉末备用。将5 g岩心粉末加入100 mL驱油剂溶液中,放入摇床,以恒定速度振荡24 h后取出,取上部清液离心后测得岩心粉末在不同浓度驱油剂溶液中的静态吸附量。将岩心粉末装入填砂模型中,注入0.3 PV不同浓度的驱油剂溶液,然后注入纯净水,检测出口端驱替液中的驱油剂含量,得到不同浓度驱油剂溶液的动态吸附量。

乳化性能。将0.2%驱油剂溶液与原油按体积比1:1混合,加入50 mL具塞比色管中,上、下、左、右各震荡20次,记录初始和静置5 min的乳化层体积。

耐温性能。将0.2%驱油剂溶液在25~180 °C下老化24 h后,测定老化后的油水界面张力。

抗盐性能。用不同矿化度的盐水配制0.2%驱油剂溶液,分析矿化度对驱油剂油水界面张力的影响。

#### (4)静态渗吸驱油效果

将岩心抽真空加压饱和地层原油,然后在90 °C恒温箱中老化24 h以上。将饱和后的岩心用铜丝缠绕置于烧杯液体中部进行静态渗吸实验(渗吸温度90 °C)。自岩心浸入液体开始瞬间即用秒表计时,记录自吸时间与岩心质量的变化,直至不再有油析出,表现为岩心质量恒定时结束实验。分别用质量差法<sup>[12]</sup>和孔隙度法<sup>[13]</sup>计算采收率。此外,还通过油砂洗油实验研究了纳米乳液驱油剂剥离油膜的能力。

#### (5)岩心驱替实验核磁共振表征

选取2块长约5 cm、直径为2.5 cm的岩样清洗、烘干(105 °C、48 h),分别编号为1#、2#岩心。测得1#、2#岩样的气测孔隙度分别为13.47%、12.79%,采用核磁共振 $T_2$ 谱测得1#、2#岩样内部束缚水占据的孔隙度分别为1.06%、0.24%。1#岩样采用纯净水加压(10 MPa)浸泡2、24 h后进行核磁共振 $T_2$ 谱和成像测试;2#岩样采用0.2%纳米驱油剂溶液加压(10 MPa)浸泡2、24 h后进行核磁共振 $T_2$ 谱和成像测试。由加压浸泡不同时间后核磁共振 $T_2$ 谱测得的可动水占据的孔隙度与气测孔隙度的百分比值,即为驱油剂占据的可动孔隙空间。

#### (6)渗透率恢复实验

依据石油天然气行业标准SY/T 5358—2010

《储层敏感性流动实验评价方法》进行实验,实验装置示意图见图 1。选取 2 块长约 5 cm、直径为 2.5 cm 的岩样清洗、烘干(105 ℃、48 h),分别编号为 3#、4# 岩心,测定气测渗透率和孔隙度。先采用标准盐水饱和岩心,在不超过临界流速的情况下正向测定驱油剂进入前的岩心液相渗透率。反向驱替 0.2% 纳米驱油剂,然后正向驱替标准盐水,连续驱替至渗透率稳定。实验温度 90 ℃。

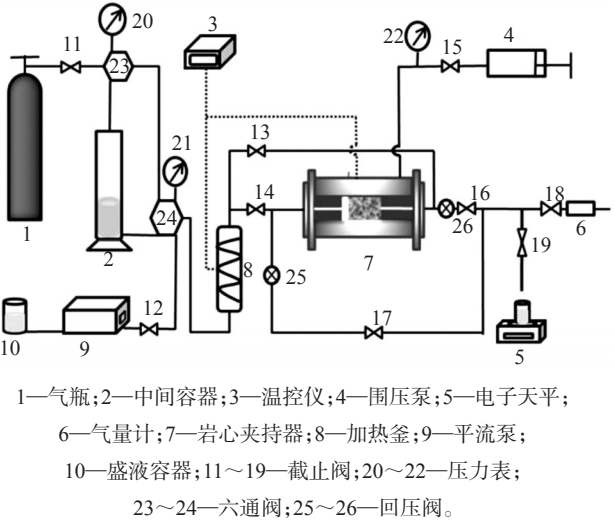


图 1 渗透率恢复实验装置示意图

2 结果与讨论

2.1 纳米乳液渗吸驱油机理

纳米乳液渗吸驱油剂由有机溶剂和复合型表面活性剂复配制得。形成的纳米乳液中同时含有溶剂和表面活性剂,单个乳滴尺寸为 10~30 nm,因此更易进入细小孔喉,实现对纳米级孔隙的洗油<sup>[14]</sup>。同常规表面活性剂相比,纳米乳液渗吸驱油剂中的纳米颗粒在油水界面分布的厚度更小,静电斥力也使得界面分布更均匀,因此具有更低的界面张力,可以改善毛细管渗吸作用,使得岩石对原油的黏附能力下降,实现对致密纳米孔隙中原油的清洗和置换<sup>[15-18]</sup>。纳米乳液渗吸驱油剂兼具亲水和亲油两种特性,能在油藏孔道运输过程中改变岩石的润湿性,增加剥离岩石表面原油的能力,提高洗油效率<sup>[19]</sup>。纳米乳液渗吸驱油技术利用胶体分散系内的纳米级颗粒进入天然裂缝网络,这些颗粒产生布朗运动,可以在常规和非常规油藏中形成长效的油气采收机制<sup>[20-21]</sup>。在整个裂缝网络中,纳米乳液可以运移

得更深更远,同时大幅降低基质中油气流动所需的驱动压差,从而更加高效地采出油气<sup>[22]</sup>。

2.2 粒径分析

0.2% 纳米乳液渗吸驱油剂水溶液的平均胶束粒径为 60 nm,与常规驱油剂磺酸盐表面活性剂相比,不同浓度的纳米乳液渗吸驱油剂的粒径均较小,说明纳米乳液渗吸驱油剂更容易进入纳米级孔隙,达到提高采收率的目的。

2.3 油水表/界面张力

不同质量分数驱油剂溶液在 25 ℃ 的表面张力和 60 ℃ 的油水界面张力见表 1。纳米乳液渗吸驱油剂的表/界面张力均较低。随着驱油剂溶液浓度的升高,溶液的表面张力和油水界面张力均呈下降趋势。当驱油剂质量分数大于 0.2% 时,表/界面张力的降幅较小。

表 1 纳米乳液渗吸驱油剂加量对表面张力及油水界面张力的影响

| 驱油剂质量分数/% | 表面张力/(mN·m <sup>-1</sup> ) | 油水界面张力/(10 <sup>-3</sup> mN·m <sup>-1</sup> ) | 驱油剂质量分数/% | 表面张力/(mN·m <sup>-1</sup> ) | 油水界面张力/(10 <sup>-3</sup> mN·m <sup>-1</sup> ) |
|-----------|----------------------------|-----------------------------------------------|-----------|----------------------------|-----------------------------------------------|
| 0.1       | 26.7                       | 8.27                                          | 0.3       | 24.2                       | 2.76                                          |
| 0.2       | 24.6                       | 2.94                                          | 0.5       | 23.9                       | 2.16                                          |

2.4 性能评价

2.4.1 润湿性能

0.2% 纳米乳液渗吸驱油剂与亲油基板经过一定时间的作用,接触角由 10° 变为 150°,玻璃基板表面由亲油性转变为亲水性,实现了润湿反转。根据黏附功公式,油对地层表面接触角的增加,可减少黏附功,即提高了洗油效率<sup>[24]</sup>。

2.4.2 吸附性能

表 2 测试结果表明,驱油剂溶液质量分数为 0.15%~0.25% 时,岩心粉末对驱油剂的吸附量较小。建议现场驱油剂使用加量控制在 0.2% 左右。

表 2 岩心粉末对驱油剂的吸附量

| 驱油剂质量分数/% | 静态吸附能力/(μg·g <sup>-1</sup> ) | 动态吸附能力/(μg·g <sup>-1</sup> ) | 驱油剂质量分数/% | 静态吸附能力/(μg·g <sup>-1</sup> ) | 动态吸附能力/(μg·g <sup>-1</sup> ) |
|-----------|------------------------------|------------------------------|-----------|------------------------------|------------------------------|
| 0.15      | 51                           | 21                           | 0.25      | 75                           | 40                           |
| 0.20      | 68                           | 36                           | 0.30      | 102                          | 48                           |

2.4.3 乳化性能

0.2% 纳米乳液渗吸驱油剂溶液、常规驱油剂磺



酸盐表面活性剂与原油混合后的初始乳化层体积均为 50 mL,静置 5 min 的乳化层体积分别为 49、43 mL,乳化效率分别为 98%、86%。纳米乳液渗吸驱油剂与原油的乳化效率好于常规驱油剂与原油的乳化效率。驱油剂的乳化能力越强,表明驱油剂更容易使油水界面分散变形,乳状液液滴更稳定,油滴更易被流体带走,避免乳化原油破裂而造成原油重新滞留在孔隙中<sup>[25]</sup>。

#### 2.4.4 耐温性能

0.2%驱油剂溶液在 25、50、90、120、150、180 ℃老化 24 h 后的油水界面张力分别为 0.0048、0.0049、0.0052、0.0054、0.0056、0.0058 mN/m。温度为 25~180 ℃时,纳米乳液驱油剂的油水界面张力随温度的升高变化较小,界面张力值较低。

#### 2.4.5 抗盐性能

用矿化度为 2、5、10、50、100 g/L 的盐水配制质量分数为 0.2%的驱油剂溶液,测得驱油剂溶液的油水界面张力分别为 0.0038、0.0049、0.0062、0.0074、0.0091 mN/m。配液盐水矿化度在 2~100 g/L 时,配制的 0.2%驱油剂溶液的油水界面张力均较低。矿化度对驱油剂油水界面张力的影响较小。矿化度为 100 g/L 时,驱油剂溶液的油水界面张力仍然保持在  $10^{-3}$  mN/m 数量级。当配液水中的钙镁离子质量浓度为 0、0.5、1、2、5 g/L 时,驱油剂溶液的油水界面张力分别为 0.0021、0.0039、0.0054、0.0076、0.0120 mN/m。随着钙镁离子含量的增大,驱油剂溶液的油水界面张力逐渐增加。当含量为 5 g/L 时,油水界面张力值为 0.012 mN/m,纳米乳液驱油剂的抗盐性能较好。

#### 2.5 纳米乳液对油水在岩心相对流动性的影响

由图 2 可知,在驱替过程中,油相相对渗透率( $K_{ro}$ )逐渐降低,水相相对渗透率( $K_{rw}$ )逐渐升高。纳米乳液改变了岩心孔喉壁面的润湿性,使水的流动性能增加,产生渗吸作用,水的相对渗透率增大,水相更多进入微小孔隙,小孔隙油被置换进入大孔隙,从而提高采油效率。水驱时的残余油饱和度为 20.9%,纳米乳液驱时的残余油饱和度为 10.8%,残余油饱和度相较水驱时降低 10.1 百分点。

#### 2.6 静态渗吸驱油效果

0.2%纳米乳液渗吸驱油剂和 0.2%常规驱油剂的驱油效果见表 3。在相同的实验条件下,纳米乳

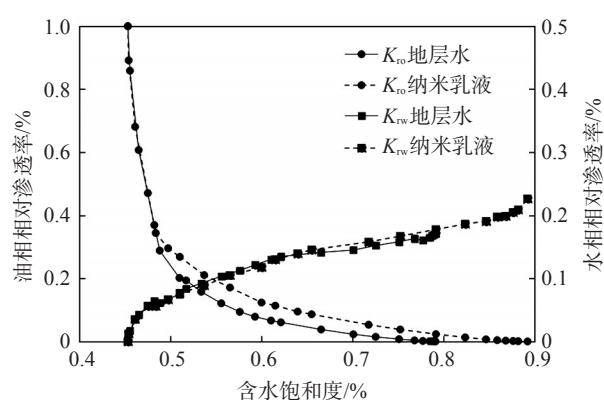


图2 纳米乳液对油水在岩心相对流动性的影响

液渗吸驱油剂的驱油效率明显好于常规驱油剂。

表3 不同类型驱油剂的驱油效果对比

| 岩心孔隙度/% | 饱和油质量/g | 驱油剂   | 平衡驱替量/mL | 采收率/% |       |
|---------|---------|-------|----------|-------|-------|
|         |         |       |          | 质量差法  | 孔隙度法  |
| 2.38    | 0.1296  | 纳米驱油剂 | 0.032    | 28.81 | 15.05 |
| 2.41    | 0.1271  | 常规驱油剂 | 0.028    | 23.74 | 11.85 |

将岩心悬挂在不同溶液中进行静态渗吸,在注入水中的岩心渗吸出油的颗粒较大且比较稀疏,在含有 0.2%、0.5%纳米驱油剂的渗吸液中出油颗粒较小且密集。这说明驱油剂的微小尺寸使其更易进入岩心细小孔喉,并使岩心中的饱和油发生乳化剥离,实现互溶扩散置换驱油。由表 4 可见,加入纳米乳液的采收率明显高于未加纳米乳液的采收率,0.2%的纳米驱油剂即可提高采收率 30 个百分点以上。随着纳米驱油剂用量的增加,渗吸采收率进一步提高。同时,纳米乳液可以延长渗吸驱油作用时间(图 3)。通过油砂洗油实验测得,当纳米乳液驱油剂加量为 0.2%时,纳米驱油剂的洗油效果较好,洗油效率可达到 46.76%。

表4 岩心浸泡渗吸实验结果

| 纳米驱油剂质量分数/% | 孔隙度/% | 渗透率/<br>( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) | 渗吸采收率/% | 平均渗吸采收率/% |
|-------------|-------|-------------------------------------|---------|-----------|
| 0           | 9.60  | 0.701                               | 20.48   | 21.33     |
|             | 11.03 | 1.884                               | 22.19   |           |
| 0.2         | 10.43 | 0.482                               | 56.36   | 55.25     |
|             | 7.30  | 0.093                               | 54.13   |           |
| 0.5         | 7.86  | 0.118                               | 61.52   | 60.90     |
|             | 8.55  | 0.239                               | 60.28   |           |

注:岩心长约 5.1 cm、直径约 2.47 cm。

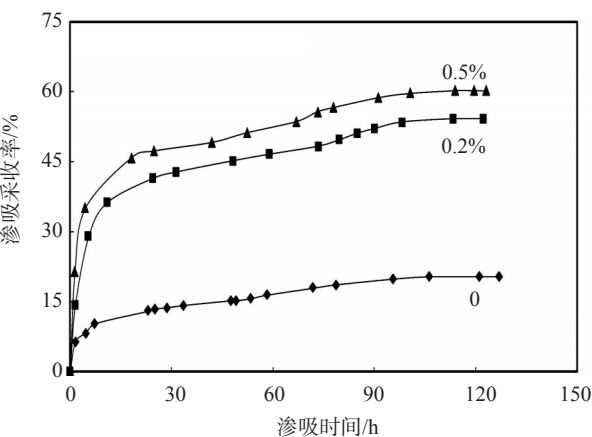


图3 岩心在不同加量纳米乳液中的渗吸采收率与渗吸时间的关系

2.7 岩心驱替实验核磁共振表征结果

为进一步验证纳米乳液驱油剂的驱替效果,收集了纳米乳液驱油剂驱和水驱的 $T_2$ 谱。 $T_2$ 谱和核磁共振成像实验结果表明,纳米驱油剂可占据98.76%的岩心可动孔隙空间,远高于纯净水(表5),进一步说明纳米驱油剂比水更易进入岩样内部孔隙空间,可增大波及体积。

表5 不同驱油体系核磁实验结果

| 岩心<br>编号 | 驱油剂       | 加压浸泡不同时间后驱油剂占据的<br>可动孔隙空间/% |       |
|----------|-----------|-----------------------------|-------|
|          |           | 2 h                         | 24 h  |
| 1#       | 纯净水       | 39.79                       | 78.73 |
| 2#       | 0.2%纳米驱油剂 | 75.05                       | 98.76 |

2.8 纳米乳液对岩心渗透率恢复性能的影响

由表6和图4可见,在纳米乳液驱油剂注入初期,岩心渗透率呈下降趋势。随着标准盐水注入时间的延长,驱替体积增加,岩心渗透率逐渐恢复。当驱替至渗透率稳定(注入体积15 PV)后,岩心渗透率均高于初始值,表明纳米乳液可解除水锁,提高岩心渗透率,具有增渗作用。

表6 岩心渗透率变化数据

| 岩心<br>编号 | 岩心<br>密度/<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | 孔隙<br>度/% | 气测渗透率/<br>( $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ) | 初始渗<br>透率/<br>( $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ) | 恢复后渗<br>透率/<br>( $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ) | 渗透率恢<br>复率/% |
|----------|------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------|
| 3#       | 2.23                                           | 12.56     | 1.608                                | 0.6406                                   | 0.6962                                    | 108.68       |
| 4#       | 2.33                                           | 11.16     | 0.253                                | 0.0230                                   | 0.0290                                    | 126.09       |

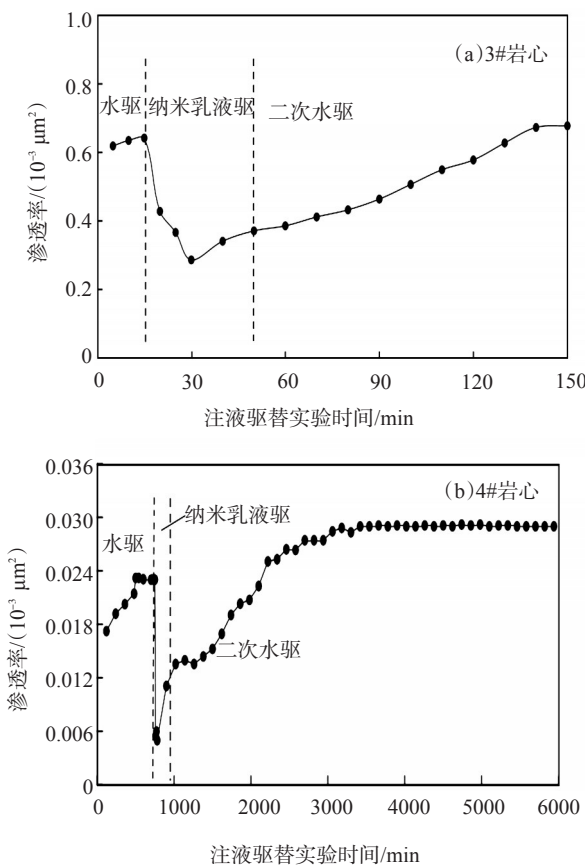


图4 岩心渗透率随时间的变化

2.9 现场应用

2.9.1 在压裂驱油方面的应用

新疆X井于2013年10月压裂投产,射开P2w(3513.5~3560.0 m),射厚13.0 m;初期日产液8.3 t,日产油8.0 t,含水3.8%;2015年9月起调开生产;目前关井。地质储量 $4.05\times10^4\text{t}$ ,累产油2516.4 t,采出程度6.2%。2019年6月2日对该井段采用前置1000  $\text{m}^3$  0.2%纳米乳液增能工艺进行了重复压裂,措施前日产油0 t,措施后平均日产油6.3 t,最高日产油9.7 t,增产效果明显,一年累计增油量为1984.4 t。对比同区块邻井Y井,未采用纳米乳液增能而直接进行重复压裂,措施前日产油0 t,措施后平均日产油3.2 t,最高日产油6.8 t,一年累计增油量为1012.7 t,增油效果只有X井的一半左右。

2.9.2 在老井注水吞吐方面的应用

在新疆油田XX-6、XX-7两口井注入增能期间,随着纳米乳液渗吸驱油剂的注入,注入压力呈降低趋势,纳米驱油剂的注入压力从50 MPa降至48 MPa,且注入排量相对较大,说明纳米驱油剂具有降

压增注的作用。

表7 注入不同驱油剂的两口井注入压力对比

| 井号   | 驱油剂类型 | 注入液量/<br>m <sup>3</sup> | 注入速度/<br>(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> ) | 注入压力/<br>MPa |
|------|-------|-------------------------|-----------------------------------------------|--------------|
| XX-6 | 常规驱油剂 | 5000                    | 1.5~1.9                                       | 50~52        |
| XX-7 | 纳米驱油剂 | 5500                    | 1.9~2.0                                       | 50~48        |

XX-6井采用注0.2%常规驱油剂增能、XX-7井采用0.2%纳米乳液渗吸驱油剂增能。30 d产量统计结果(表8)表明,XX-7井产量是XX-6井的3.6倍。两口井总产量统计结果(表9)表明,XX-7井产量是XX-6井的1.6倍,返排率比XX-6井降低45%。上述实际生产过程说明,纳米乳液渗吸驱油剂具有更好的驱油置换效果,可有效提高见油速度及初期原油产量,达到快速增产的效果。

表8 注入不同驱油剂的两口井30 d效果对比

| 井号   | 平均压力/<br>MPa | 平均液体<br>产量/t | 平均含水<br>量/% | 日产油/t | 累产油/t |
|------|--------------|--------------|-------------|-------|-------|
| XX-6 | 6.1          | 10.5         | 87.9        | 1.32  | 39.7  |
| XX-7 | 8.2          | 12.6         | 61.2        | 4.81  | 144.2 |

表9 注入不同驱油剂的两口井总生产情况对比

| 井号   | 亏空量/<br>m <sup>3</sup> | 生产时<br>间/d | 累产液/<br>t | 累产油/<br>t | 平均日<br>产油/t | 返排率/<br>% |
|------|------------------------|------------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| XX-6 | 10 533                 | 196        | 1932.6    | 578.5     | 2.95        | 27.1      |
| XX-7 | 12 083                 | 185        | 1718.3    | 899.8     | 4.86        | 14.9      |

### 3 结论

纳米乳液驱油剂具有油水界面张力低、耐温耐盐性能好、与原油乳化效果好的特性。纳米乳液驱油剂可进入细小孔喉,驱动更多的残余油,渗吸驱油效果较好。纳米乳液驱油剂在压裂驱油和老井注水吞吐的现场应用较好,增产效果明显。

#### 参考文献:

- [1] 贺丽鹏, 罗健辉, 丁彬, 等. 特低/超低渗油藏纳米驱油剂的制备与性能[J]. 油田化学, 2018, 35(1): 81-84.
- [2] XIA H, WANG D, WU W, et al. Effect of the visco-elasticity of displacing fluids on the relationship of capillary number and displacement efficiency in weak oil-wet cores [C]// Proceedings of the Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Jakarta, Indonesia, 2007.

- [3] MORVAN M, DEGRE G, BEAUMONT J, et al. Optimization of viscosifying surfactant technology for chemical EOR [C]// Proceedings of the SPE Improved Oil Recovery Symposium. Tulsa, Oklahoma, USA, 2012.
- [4] 吴鹏, 宋考平, 张跃, 等. 聚合物驱油体系高效络合剂研究[J]. 特种油气藏, 2020, 27(1): 114-120.
- [5] 王启民, 廖广志. 聚合物驱油技术的实践与认识[J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18(4): 1-5.
- [6] 刘晨, 王业飞, 于海洋, 等. 低渗透油藏表面活性剂驱油体系的室内研究[J]. 石油与天然气化工, 2011, 40(5): 486-489.
- [7] LI K X, JING X Q, HE S, et al. Laboratory study displacement efficiency of viscoelastic surfactant solution in enhanced oil recovery [J]. Energ Fuel, 2016, 30(6): 4467-4474.
- [8] 刘鹏, 王业飞, 张国萍, 等. 表面活性剂驱乳化作用对提高采收率的影响[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(1): 99-102.
- [9] ZHOU Y, YIN D, CAO R, et al. The mechanism for pore-throat scale emulsion displacing residual oil after water flooding [J]. J Pet Sci Eng, 2018, 163: 519-525.
- [10] PANG S, PU W, XIE J, et al. Investigation into the properties of water-in-heavy oil emulsion and its role in enhanced oil recovery during water flooding [J]. J Pet Sci Eng, 2019, 177: 798-807.
- [11] YOUSSEF M I, EL-MAGHRABY R M, SALEH S M, et al. Silica nanofluid flooding for enhanced oil recovery in sandstone rocks [J]. Egypt J Pet, 2018, 27(1): 105-110.
- [12] 濮御, 王秀宇, 濮玲. 静态渗吸对致密油开采效果的影响及其应用[J]. 石油化工高等学校学报, 2016, 29(3): 23-27.
- [13] 李爱芬, 何冰清, 雷启鸿, 等. 界面张力对低渗亲水储层自发渗吸的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(4): 67-74.
- [14] 丁彬, 熊春明, 耿向飞, 等. 致密油纳米流体增渗驱油体系特征及提高采收率机理 [J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 756-764.
- [15] ALI J A, KOLO K, MANSHAD A K, et al. Recent advances in application of nanotechnology in chemical enhanced oil recovery: Effects of nanoparticles on wettability alteration, interfacial tension reduction, and flooding [J]. Egypt J Pet, 2018, 27(4): 1371-1383.
- [16] 李佳, 陈明贵, 耿向飞, 等. 低界面张力活性纳米流体的研制与渗吸驱油机理分析 [J]. 油田化学, 2021, 38(2): 284-290.
- [17] ALOMAIR O A, MATAR K M, ALSAIED Y H. Experimental study of enhanced-heavy-oil recovery in Berea sandstone cores by use of nanofluids applications [J]. SPE Reserv Eval Eng, 2015, 18(3): 387-399.
- [18] BABADAGLIT. Dynamics of capillary imbibition when surfactant, polymer, and hot water are used as aqueous phase for oil recovery [J]. J Colloid Interface Sci, 2002, 246(1): 203-213.
- [19] KARIMI A, FAKHROUEIAN Z, BAHRAMIAN A, et al. Wettability alteration in carbonates using zirconium oxide

- nanofluids: EOR implications [J]. *Energ Fuel*, 2012, 26(2): 1028–1036.
- [20] EL-DIASTY A I, ALY A M. Understanding the mechanism of nanoparticles applications in enhanced oil recovery [C]// *Proceedings of the SPE North Africa Technical Conference and Exhibition*. Cairo, Egypt, 2015.
- [21] ZHANG H, NIKOLOV A, WASAN D. Enhanced oil recovery (EOR) using nanoparticle dispersions: Underlying mechanism and imbibition experiments [J]. *Energ Fuel*, 2014, 28(5): 3002–3009.
- [22] MCCLEMENTS D J, XIAO H. Potential biological fate of ingested nanoemulsions: Influence of particle characteristics [J]. *Food Funct*, 2012, 3(3): 202–220.
- [23] 徐太平, 李栓, 周京伟, 等. 一种纳米乳液混相驱油剂及其制造方法: CN202010274769.8[P]. 2020-04-09.
- [24] 雷光伦, 李希明, 陈月明, 等. 微生物对岩石表面及地层流体性质的影响[J]. *油田化学*, 2001, 18(1): 71–75.
- [25] 孙盈盈, 岳湘安, 张立娟, 等. 乳化作用对水驱后残余油膜效果的实验与评价[J]. *新疆石油地质*, 2014, 35(1): 73–76.

### Performance Evaluation and Application of Nanoemulsion Imbibition Oil-displacing Agent

DING Xiaohui<sup>1</sup>, ZHOU Dan<sup>2</sup>, WU Kai<sup>3</sup>, LI Shuan<sup>1</sup>, HE Yong<sup>2</sup>, YU Bo<sup>2</sup>, CHEN Li<sup>1</sup>

(1. Gepetto Oil Technology Group Company, Ltd, Chengdu, Sichuan 610015, P R of China; 2. Baikouquan Oil Production Plant of Xinjiang Oilfield Branch Company, Karamay, Xinjiang 834000, P R of China; 3. Downhole Service Company, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company, Ltd, Chengdu, Sichuan 610051, P R of China)

**Abstract:** In order to meet the needs of enhanced oil recovery in low-permeability reservoir, a new type of nanoemulsion was developed as an oil-displacing agent. Its interfacial property, wettability, temperature and salt resistance were evaluated. The oil displacement efficiency of the nanoemulsion oil-displacing agent was investigated by magnetic resonance, relative permeability experiment and spontaneous imbibition experiment. At the same time, the performance of oil-displacing agent was compared with that of conventional sulfonate surfactant. The results showed that the average particle size of the nanoemulsion oil-displacing agent was 60 nm. When the mass fraction of the nanoemulsion oil-displacing agent increased, the surface tension of solution and oil-water interfacial tension gradually decreased. When the dosage of oil-displacing agent was 0.2%, the oil-water interfacial tension could reach  $2.94 \times 10^{-3}$  mN/m, showing good interfacial activity. At the same time, it could change the core surface from lipophilicity to hydrophilicity, realizing wetting reversal. When the dosage of nanoemulsion oil-displacing agent was 0.2%, the emulsification efficiency to crude oil could reach 98%. The nanoemulsion oil-displacing agent had excellent temperature resistance and salt resistance. The static imbibition could increase oil recovery by more than 30 percentage points. The application of fracturing flooding in Xinjiang oilfield and water injection huff and puff in old wells showed that the nano imbibition flooding technology had better stimulation effect than conventional flooding technology. When the liquid production was not much different, the flowback rate was lower, while the oil production was higher. The oil displacement replacement effect was better.

**Keywords:** nanoemulsion; imbibition; oil-displacing agent; surfactant; enhanced oil recovery