

文章编号:1000-4092(2020)04-669-06

纳米驱油技术理论与实践*

罗健辉^{1,2}, 杨海恩^{1,3}, 肖沛文^{1,2}, 王平美^{1,2}, 郑力军^{1,3}, 王光义^{1,3}, 郭国栋^{1,4}

(1. 中国石油天然气集团有限公司纳米化学重点实验室, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
3. 中国石油长庆油田分公司, 陕西 西安 710081; 4. 中国石油新疆油田公司, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:根据“尺寸足够小、强憎水强亲油、分散油聚并”3大特性的纳米智能驱油剂战略设计, 针对低渗透油藏“注不进, 采不出”的技术瓶颈, 提出“纳米水和纳米油”创新设想, 以SiO₂纳米颗粒为载体, 通过在同一纳米颗粒上实现多功能集成, 研制出具有破坏/减弱水分子强氢键缔合作用的第一代纳米驱油剂 iNanoW1.0。通过分子动力学模拟和毛细作用分析实验, 分析了水中加入的介质对减弱/破坏水分子间氢键作用力的影响; 通过低场核磁分析实验和岩心驱替实验, 比较了 iNanoW1.0 驱和普通水驱的注入性能与驱替效果, 并在长庆姬源油田进行了现场应用。结果表明, iNanoW1.0 通过破坏水分子动态网络结构, 使普通水变成“纳米水”。与普通水驱相比, iNanoW1.0 驱的注入性与驱替效果均较好, 注入启动压力梯度降低、特/超低渗透油藏普通水驱不可及波及体积增加。长庆超低渗现场先导试验总体呈现增液、增油、降递减的特点。长庆油田超低渗油藏首次通过注水提高了采收率, 发展了低渗透油藏水驱开发理论。图6表3参13

关键词:纳米; 驱油剂; 纳米水; 纳米油; 采收率; 水驱; 长庆油田

中图分类号:TE357; TE348 **文献标识码:**A **DOI:**10.19346/j.cnki.1000-4092.2020.04.018

我国中高渗老油田经过一次采油、二次采油, 甚至三次采油, 采收率已达40%~60%, 但仍有40%以上的原油未被动用。我国新增石油资源以低渗透-致密储层为主, 水驱约有30%储层注不进水, 超低渗储层常规注水难以建立有效驱替关系。中高渗老油田进一步提高采收率的瓶颈与低渗透-致密油提高采收率的瓶颈基本一致, 均存在“注不进, 采不出”问题, 常规提高采收率技术在于解决水驱窜流和水驱可波及区域的洗油效率, 对“注不进, 采不出”特/超低渗透油藏基本无效^[1-2]。根据中国石油科技部原总经理袁士义院士提出“尺寸足够小、强憎水强亲油、分散油聚并”的创新发展战略^[3], 本课题组认为特/超低渗透油藏水“注不进”的主要原因是水分子的强氢键缔合作用, 形成“超级弱凝胶”动态网络结构造成的; 油“采不出”的主要原因是“油”分子的相互作用, 形成“超级弱凝胶”动态网络

结构造成的。以纳米级材料为载体, 在同一纳米颗粒上实现多功能集成, 破坏/减弱水分子的强氢键缔合作用, 形成“小分子水”, 即“纳米水”, 破坏/减弱“油”分子的相互作用, 形成“小分子油”, 即“纳米油”, 使水可以“注得进”, 油可以“采得出”。本文报道的第一代纳米驱油剂 iNanoW1.0, 初步实现了“纳米水”的设想, 在长庆油田现场先导试验中效果显著, 建立了水驱驱替关系, 首次通过注水看到了提高采收率的巨大潜力, 发展了水驱开发理论, 有望成为低渗透油藏水驱进一步提高采收率的主体技术。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

第一代纳米驱油剂 iNanoW1.0, 自制; NaCl、CaCl₂、NaI 与 Na₂SO₄, 工业级, 国药集团化学试剂有限公司; 蒸馏水, 自制; 四川侏罗系露头砂岩 LC-1b,

* 收稿日期:2020-10-31;修回日期:2020-11-27。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“纳米智能驱油剂研制”(项目编号2018A-0907)。

作者简介:罗健辉(1962-), 男, 教授级高级工程师, 中国石油天然气集团有限公司纳米化学重点实验室主任, 1983年毕业于北京大学放射化学专业, 从事纳米驱油技术、三次采油用聚合物研究, 通讯地址:100083 北京市海淀区学院路20号中国石油勘探开发研究院910信箱, E-mail:luojh@petrochina.com.cn。

直径 2.5 cm, 长度 5 cm, 气测渗透率为 $1.28 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 均质、无裂缝, 为超低渗岩心; 新疆天然岩心, 直径 2.5 cm, 长度 5 cm, 气测渗透率分别为 $0.357 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.463 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 为超低渗岩心。

毛细作用分析系统, 中国石油勘探开发研究院自主研发; 低场核磁共振岩心驱替装置, 包括高温高压驱替部分和岩心低场核磁分析部分, 分别由南通华兴石油仪器有限公司和上海纽迈电子科技有限公司生产; 岩心驱替装置, 扬州华宝石油仪器有限公司。

1.2 实验方法

(1) 分子动力学模拟

模拟工作采用 Materials Studio (MS) 软件完成。模型由 512 个水分子、6 个阳离子以及相同电荷量的阴离子构成。在 343 K 下进行了恒温恒压系统 (NPT) 分子动力学计算, 力场采用 Dreiding。为了保证模拟体系最终趋于平衡, 模拟时间步长设定为 15 fs, 截断半径设定为 3 nm; 使用 Nose 方法进行恒温调节, Berendsen 方法进行恒压调节^[4-5]。

(2) 毛细作用分析测试

用毛细作用分析系统实时测量毛细管(束)驱替过程中注入压差随时间的变化(见图 1), 通过改变毛细管内径的大小及其排布方式实现对不同渗透率油藏的模拟。测试过程中使用内径为 $2.0 \mu\text{m}$ 、长为 60 cm 的亲水毛细管。在室温条件下, 恒流量注入水、盐溶液 (NaCl、CaCl₂、NaI 与 Na₂SO₄) 和质量分数为 0.5% 的第一代纳米驱油剂 iNanoW1.0, 直至毛细管末端有液体流出, 记录注入压差随时间的变化^[6-7]。

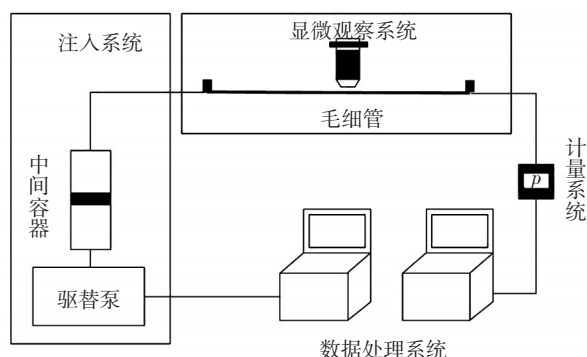


图1 毛细作用分析系统示意图

(3) 低场核磁分析实验

低场核磁共振岩心驱替装置主要由核磁共振

单元、驱替单元、远程控制单元、计量单元 4 部分组成。利用该装置对含有水/油流体的岩石进行核磁共振测试可以对应得到岩石孔隙中含 ¹H 质子流体的横向弛豫信号 (T_2 谱)。岩心的横向弛豫 T_2 信号谱图可以反映 ¹H 质子流体在岩心中的空间分布; 含 ¹H 质子流体所处的孔隙直径与横向弛豫时间正相关。岩心的横向弛豫 T_2 谱图的信号幅度和弛豫时间围成的峰面积与对应孔隙内含 ¹H 质子流体体积正相关。基于岩心的 T_2 谱可以得到, 获得含 ¹H 质子流体在岩心中不同尺寸范围孔隙的分布及含量。通常用氘水 ²H 饱和岩心以区分含 ¹H 质子流体。实验具体流程如下^[6,8]。①饱和岩心、测试稳定注入压力: 以恒流量 0.05 mL/min 对气测渗透率为 $1.28 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心 LC-1b 饱和氘水, 实时跟踪计量压力数值。随着时间的延长 (约 6 h), 岩心两端压差趋于稳定 (1.12 MPa)。后续恒压驱替过程中选用此压力作为驱替压力。②普通水驱: 在恒压 1.12 MPa 下注入普通水, 直到核磁信号不再增加后, 离线测试获得普通水驱稳定后的 T_2 谱图, 对应峰面积记为 S_H ; ③iNanoW1.0 驱替: 在步骤②的基础上, 恒压 1.12 MPa 下注入 0.5% iNanoW1.0, 直到核磁信号不再增加后, 离线测试获得 iNanoW1.0 驱稳定后的 T_2 谱图, 对应峰面积记为 S_N ; ④将上述测试数据带入式 (1), 计算 iNanoW1.0 在普通水驱的基础上增加的波及体积值 I 。

$$I = \frac{S_N - S_H}{S_H} \times 100\% \quad (1)$$

(4) 岩心驱替实验

将同一块新疆天然岩心切割成直径 2.5 cm、长度 5 cm 的两块岩心, 在恒压 25 MPa 下分别注入蒸馏水和 0.5% iNanoW1.0, 对出液量进行实时计量。

2 结果与讨论

2.1 分子动力学模拟

单个水分子的直径约为 0.4 nm。由于单个水分子本身同时是氢键的供体 (氢原子), 也是氢键的受体 (氧原子), 因此, 水分子间氢键作用使其在自然界中并不是以单个水分子的形式存在^[9]。水分子间的强氢键缔合作用会形成大分子动态网络结构——“超级弱凝胶” (即“水分子簇”或“水团簇”的动态联合体)^[10-11], 这也是特/超低渗油藏注不进水的

主要原因。

破坏水分子间强氢键缔合作用有助于将“大分子水”转变为“小分子水”、即“纳米水”,解决特/超低渗油藏的注入性问题。为了揭示水中介质对氢键缔合作用的影响,构建了由 512 个水分子、6 个阳离子以及相同电荷量的阴离子构成的分子动力学模型。通过分子动力学模拟的方法研究了 4 种真实盐溶液中水的扩散系数(D)(见表 1)。4 种真实盐溶液中水的扩散系数从大到小依次为: $D(\text{NaI-H}_2\text{O}) > D(\text{H}_2\text{O}) > D(\text{NaCl-H}_2\text{O}) > D(\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}) > D(\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O})$, NaI 溶液的水扩散系数最大, CaCl_2 溶液的水扩散系数最小。水扩散系数的大小与水分子间氢键作用力的强弱负相关,水扩散系数越大,说明水分子自由度越大,氢键缔合作用越弱。 $D(\text{盐溶液}) > D(\text{H}_2\text{O})$ 表明其具有减弱/破坏水分子间氢键的作用, $D(\text{盐溶液}) < D(\text{H}_2\text{O})$ 表明其具有促进水分子间氢键形成的作用。由此可见, NaI 有助于破坏水分子间氢键作用,而 CaCl_2 促进水分子间氢键形成。对比 NaCl 和 NaI 的水扩散系数可见, I^- 比 Cl^- 对氢键的破坏作用更强;对比 NaCl 与 CaCl_2 (阳离子不同)、NaCl 与 Na_2SO_4 (阴离子不同)的水扩散系数可见,二价离子对氢键缔合起促进作用。以上结果表明,在水中加入合适的介质可以减弱/破坏水分子间氢键作用力,有助于“纳米水”的形成。

表 1 70℃ 下真实盐溶液中水的扩散系数

体系	自由水扩散系数 D_f ($10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	束缚水扩散系数 D_b ($10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
H_2O	1.110	0.931
$\text{NaI-H}_2\text{O}$	1.183	0.948
$\text{NaCl-H}_2\text{O}$	1.087	0.922
$\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$	0.893	0.844
$\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$	0.874	0.772

在以上研究的基础上,构建了由纯 SiO_2 纳米颗粒和 4000 个水分子组成的周期性空间格子分子动力学模型。通过分子动力学模拟计算,得到纯水和 $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 中水分子的扩散系数分别为 1.012、1.030,氢键平均键长分别为 0.1995、0.2003 nm。在水中加入纳米颗粒后,氢键平均键长明显增大。纯 SiO_2 纳米颗粒有助于水扩散,具有减弱水分子之间氢键相互作用的能力。

2.2 毛细作用分析

为了评价不同类型化学剂水溶液在纳/微米尺度的毛细阻力和注入性能,本课题组自主研发了毛细作用分析系统。化学剂水溶液的注入性能与该化学剂减弱/破坏水分子间氢键能力和水扩散系数相关。注入压差越小,注入性能越好,其减弱/破坏水分子间氢键能力越强,相应水扩散系数越大。

通过毛细作用分析系统对按动力学模型比例(6 个离子:512 个水分子)配制的盐溶液($\text{NaI-H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 和 $\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$)进行注入性能评价。通过记录在注入速率为 0.1 mL/min、毛细管内径为 2 μm 、不同时间下的注入压差得到注入压差—注入时间曲线(见图 2)。盐溶液的注入压差(Δp)从小到大依次为: $\Delta p(\text{NaI-H}_2\text{O}) < \Delta p(\text{H}_2\text{O}) < \Delta p(\text{NaCl-H}_2\text{O}) < \Delta p(\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}) < \Delta p(\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O})$,与其对应的扩散系数的规律正好相反。毛细作用分析测试结果很好的验证了分子动力学模拟结果,说明“纳米水”可以实现。

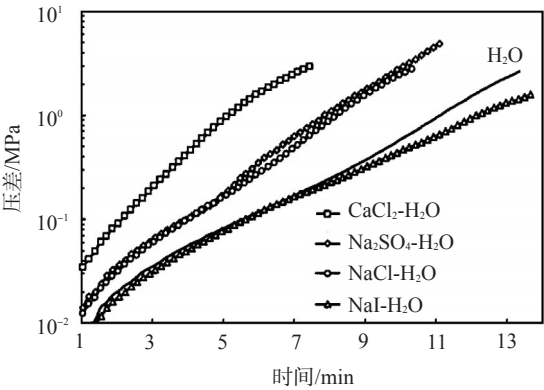


图 2 不同种类盐溶液注入压差随时间的变化曲线

在分子模拟实验结论的基础上,本课题组创新研制了以 SiO_2 纳米颗粒为载体的第一代纳米驱油剂 iNanoW1.0^[12]。iNanoW1.0 可有效减弱/破坏水分子间的氢键作用^[6]。在注入速率为 0.005 mL/min、毛细管内径为 2 μm 时, iNanoW1.0 室内样品和工业产品(制备室内样品和工业产品的原料和配比均相同,室内样品为百克量级,工业产品为百公斤级)的注入压差和注入时间曲线如图 3 所示。相对于普通水, iNanoW1.0 可大幅降低注入压差和启动压力梯度,具有较好的注入性能。以上结果表明, iNanoW1.0 通过破坏大分子动态网络结构,将普通的“大分子水”变为“纳米水”。

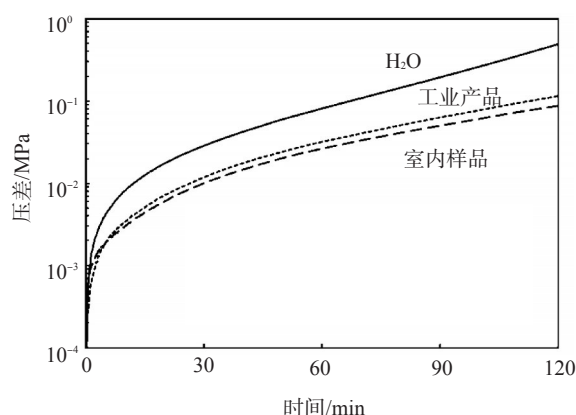


图3 iNanoW1.0驱注入压差随时间的变化曲线

2.3 低场核磁分析

利用低场核磁测试技术,对露头岩心 LC-1b 分别经过水驱和 iNanoW1.0 驱替后,采用离线测试的方法评价其扩大波及体积效果。通过离线数据采集可以排除残留液体、压力等因素的干扰。岩心 LC-1b 经过水驱和 iNanoW1.0 驱替达到平衡后的 T_2 谱图如图4所示。低场核磁测试技术得到的 T_2 谱图中的弛豫时间与孔隙大小呈正相关。图4中 P1、P2 和 P3 峰分别对应岩心小孔隙、中孔隙和大孔隙,相应峰面积(见表2)对应于不同尺寸孔隙中流体的体积。对比分析图4中的 T_2 谱图可以看出,水驱和 iNanoW1.0 驱平衡后的 P3 峰基本重合; iNanoW1.0 驱的 P2 峰信号强度略强于水驱,且 iNanoW1.0 驱 P1 峰信号强度明显高于水驱。

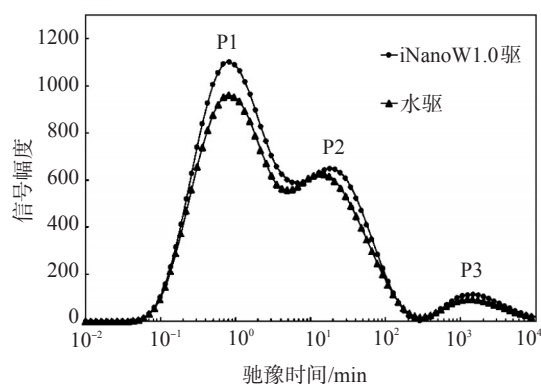


图4 普通水驱和 iNanoW1.0 驱低场核磁离线数据

表2 普通水驱和 iNanoW1.0 驱不同孔隙 T_2 谱峰面积

注入液	孔隙 T_2 谱峰面积			总和
	小孔隙(P1)	中孔隙(P2)	大孔隙(P3)	
水	16287	9400	1306	26993
iNanoW1.0	18836	9694	1469	29999

以上结果表明,相对于普通水驱, iNanoW1.0 驱可以进一步提高岩心小孔隙和中孔隙部分的波及体积,且 iNanoW1.0 可大幅提高小孔隙部分的波及体积。由式(1)计算可得, iNanoW1.0 驱可在普通水驱的基础上增加波及体积约 13.7%,且主要波及普通水驱波及不到的小孔隙(对应超低渗区域)部分。结合分子动力学模拟和毛细作用测试结果分析, iNanoW1.0 加入普通水中后,普通水变成“纳米水”,使其可以进入更小的孔喉中,进而增加小孔隙波及体积,提高可采储量。

2.4 岩心驱替效果

为了进一步验证 iNanoW1.0 减弱/破坏水分子间氢键作用力,形成“纳米水”机理,选取新疆超低渗天然岩心,将其切割成两块岩心 XJ-CD-1 ($0.463 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 和 XJ-CD-2 ($0.357 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),在恒压(25 MPa)条件下分别注入普通水和 0.5% iNanoW1.0。普通水在恒压(25 MPa)下 48 h 未通过岩心,出液量为 0 mL;而在相同的条件下,注入 0.5% iNanoW1.0 驱油剂后的出液量为 0.52 mL。结果表明,纳米驱油剂使原来无法建立水驱驱替关系的特低渗储层建立了水驱驱替关系,进一步验证了“纳米水”形成机理。

2.5 现场先导试验

长庆油田是国内低渗透油田的代表,整体具有低渗透油田典型的“三低”特征:渗透率低、地层压力低、储量丰度低,超过 90% 的油井不具备自然产能^[13]。目前主要以水驱开发为主,平均单井日产油能力仅为 1.3 t,具有大幅度提高采收率空间。姬源油田先导试验区平均气测渗透率为 $0.57 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为典型的超低渗油藏,存在“注不进”、水驱优势方向逐步突显、有效驱替关系难以建立和自然递减快等问题,亟需转变现有开发方式,实现稳定高效开发。

鉴于第一代纳米驱油剂 iNanoW1.0 优异的室内评价性能,2018 年 11 月在长庆姬源油田开展第一代纳米驱油剂先导试验,陆续实施注入井 10 口,对应油井 36 口。自 iNanoW1.0 注入以来,排除受杆断、测压、供液不足等影响的油井,2019 年 7 月到 2020 年 6 月期间(2019 年 7 月扩大为井组试验),先导试验区参与分析油井日产液由 87.13 m^3 增至 94.06 m^3 ,日产油由 61.71 t 增至 66.86 t,阶段净增油 653 t,累

计递减增油(相对于图 5 中按照原有开发方式预测日产油趋势线的增油量)2483 t,实施区域月度自然递减率由 1.48%降至-0.76%(见图 5)。通过分析先导试验区中心油井,根据实施动态曲线(见图 6)可以看出,注入 iNanoW1.0 后,中心井日产液由 12.56 m³增至 14.66 m³,日产油由 6.94 t 增至 7.46 t,含水上升速度减缓,月度自然递减率由 3.5%降至-0.68%,阶段递减增油 343 t。以上数据表明,注入第一代纳米驱油剂 iNanoW1.0 后,油井总体呈现增液、增油、降递减的特点。

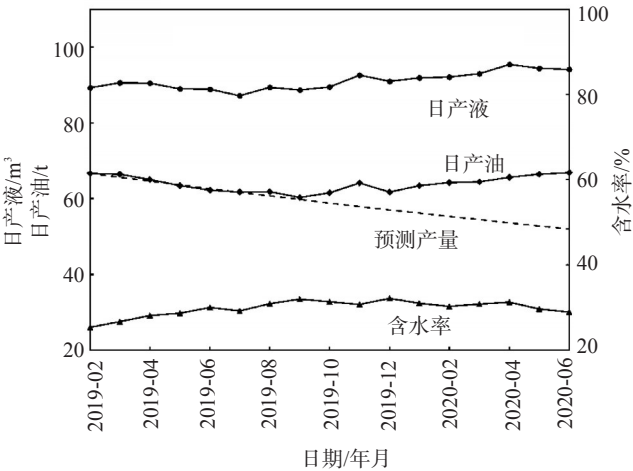


图 5 iNanoW1.0 先导试验区参与分析油井实施动态曲线

进一步分析 iNanoW1.0 先导试验区的主向井和侧向井试验增油、降递减等效果发现(见表 3),尽管侧向井单井日增液(0.33 m³)低于主向井(0.46 m³),但是对应单井日增油(0.29 t)高于主向井(0.24 t)。这表明在普通水驱替过程中加入 iNanoW1.0 可将地层非优势通道中之前无法采出的油驱替出来,改变了地层水驱驱替通道,侧向井采出液中含水降低,含水变化率为-1.33%。总体而言,先导试验区侧向井单井日增油、含水变化率和阶段增油均优于主向井。主向井和侧向井试验效果初步表明,纳米驱油剂使原来无法建立水驱驱替关系的超低渗储层建立了水驱驱替关系,转变了超低渗油藏开发方式,发展了低渗透油藏水驱开发理论,在长庆油田超低渗油藏首次通过注水看到了提高采收率的巨大潜力,规模应用前景广阔。

基于第一代纳米驱油剂 iNanoW1.0 先导试验效果与室内研究结果吻合,验证了“超级弱凝胶”是特/超低渗油藏注水困难的主要原因,表明 iNanoW1.0 具有减弱/破坏水分子间氢键作用的能力,可以将

“大分子水”变为“纳米水”,增加普通水驱波及不到的区域的波及体积,对油田增加可采储量、提高采收率意义重大。

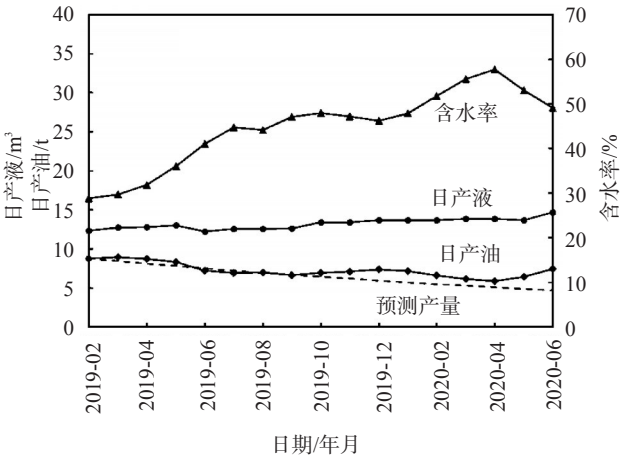


图 6 iNanoW1.0 先导试验区中心油井实施动态曲线

表 3 iNanoW1.0 先导试验区主向井和侧向井试验结果

分类	单井日增液/m ³	单井日增油/t	含水变化率/%	阶段净增油/t	阶段递减增油/t
主向井	0.46	0.24	1.03	236	1031
侧向井	0.33	0.29	-1.33	891	1629

3 结论

根据中国工程院袁士义院士“尺寸足够小、强憎水强亲油、分散油聚并”3 大特性的纳米智能驱油剂战略设计开展颠覆性技术研究,以纳米级材料为载体,通过在同一纳米颗粒上实现多功能集成,研制出具有减弱/破坏水分子强氢键缔合作用的第一代纳米驱油剂 iNanoW1.0,使普通水变成“纳米水”,降低注入启动压力梯度,大幅增加特/超低渗透油藏普通水驱不可及波及体积,初步解决了低渗透油藏“注不进”的技术瓶颈。

第一代纳米驱油剂 iNanoW1.0 先导试验效果验证了纳米驱油理论设想。纳米驱油剂使原来无法建立水驱驱替关系的超低渗储层建立了水驱驱替关系,转变了超低渗油藏开发方式,发展了低渗透油藏水驱开发理论。长庆油田 2019 年原油年产量约 2400 万吨,自然递减约 300 万吨/年,若采用纳米驱油技术有望保持原油产量不递减,相当于增加一个大油田。中国石油天然气集团有限公司累计低渗透探明储量约 132 亿吨,其中约 1/3 孔隙体积注不

进水,纳米驱油技术有望发展成为低渗透油藏水驱进一步提高采收率的主体技术,应用潜力巨大。

第一代纳米驱油剂 iNanoW1.0 使普通水变成“纳米水”,初步解决了低渗透油藏“注不进”的技术瓶颈,继续攻关破坏/减弱“油”分子的相互作用,将普通油变为“纳米油”,使油更容易“采得出”,将在地层孔隙中被吸附的残余油解吸附后驱替出来,提高洗油效率,解决低渗透油藏和中/高渗透油藏低渗透区域“采得出”的技术瓶颈,技术发展潜力巨大。

集成“纳米水”与“纳米油”技术,有望改善致密储层流体渗流规律,使致密油等非常规资源革命性的改变开发方式高效动用,减少对压裂的依赖,提高高压裂增产效果。

参考文献:

- [1] 罗健辉,王平美,彭宝亮,等.低渗透油田水驱扩大波及体积技术探讨[J].油田化学,2017,34(4):756-760.
- [2] 罗健辉,雷群,丁彬,等.智能纳米驱油剂应用展望[R].北京:中国化学会学术年会,2014.
- [3] 罗健辉,袁士义,钟太贤,等.纳米驱油剂研究分析[C]//第二届中国工程院/国家能源局能源论坛论文集.北京,2012:887-890.
- [4] HODGES M P, STONE A J. Modeling small hydronium-water clusters[J]. J Chem Phys, 1999, 110(14): 6766-6772.
- [5] 罗健辉,丁彬,燕友果,等.烷烃修饰SiO₂纳米颗粒油/水界面吸附特性的分子动力学模拟[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(2):130-136.
- [6] 雷群,罗健辉,彭宝亮,等.纳米驱油剂扩大水驱波及体积机理[J].石油勘探与开发,2019,46(5):1-6.
- [7] 贺丽鹏,罗健辉,丁彬,等.特低/超低渗透油藏纳米驱油剂的制备与性能[J].油田化学,2018,35(1):81-90.
- [8] 杨正明,姜汉桥,周荣学,等.用核磁共振技术测量低渗含水气藏中的束缚水饱和度[J].石油钻采工艺,2008,30(3):56-59.
- [9] 李睿华,蒋展鹏,师绍琪,等.¹⁷O-核磁共振研究给水中常见离子对水缔合的影响[J].环境科学,2002,23(3):44-48.
- [10] 李福志,张晓健,吕木坚.用¹⁷O核磁共振研究液态水的团簇结构[J].环境科学学报,2004,24(1):6-9.
- [11] 杨海艳.纳米水分子簇的特性与生物学效应[D].天津:天津大学,2009:30-32.
- [12] 肖沛文,罗健辉,王平美,等.纳米驱油剂:从实验室到工业化生产及其评价指标的初步建立[C]//低渗透油藏水驱提高采收率新技术论文集.北京:石油工业出版社,2020:296-303.
- [13] 王思仪,刘艳琴,任肇才,等.长庆不同类型油藏开发水平评价预警技术研究与应用[C]//低渗透油藏水驱提高采收率新技术论文集.北京:石油工业出版社,2020:97-110.

Nanofluid Flooding Technology: Theory and Practice

LUO Jianhui^{1,2}, YANG Hai'en^{1,3}, XIAO Peiwen^{1,2}, WANG Pingmei^{1,2}, ZHENG Lijun^{1,3}, WANG Guangyi^{1,3}, WU Guodong^{1,4}

(1. Key Laboratory of Nano Chemistry, CNPC, Beijing 100083, P R of China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, P R of China; 3. Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710081, P R of China; 4. Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, P R of China)

Abstract: Based on the strategic design of intelligent nano-sized oil-displacement agent with three properties of ultra-small size, super lipophilicity and hydrophobicity, and coalescence of dispersed oil droplet, innovative idea of nano-sized water and nano-sized oil was put forward to overcome the technical bottleneck of “no injection, no production” of low-permeability reservoir. By means of modifying nano-sized particle with functional groups, the first generation of nano-sized oil-displacement agent, iNanoW1.0, was developed. Normal water could be transformed into “nano-sized water” in presence of iNanoW1.0 by weakening or destroying the association of hydrogen bonds between water molecules. Through the molecular dynamic simulation and capillary analysis, the effect of adding medium to water on the hydrogen bond by weakening or breaking between water molecules was analyzed. By conducting low field nuclear magnetic resonance displacement experiment and core displacement experiment, the injection performance and displacement effect of iNanoW1.0 and normal water were compared. The pilot test with iNanoW1.0 as oil-displacement agent was carried out in Changqing oilfield of ultra-low permeability reservoir. The results showed that iNanoW1.0 could transform normal water into nano-sized water by destroying the dynamic network structure of water molecule. Compared with normal water, iNanoW1.0 possessed better injection performance and displacement effect. With lower starting pressure gradient, iNanoW1.0 could expand the swept volume in extra-low or ultra-low permeability reservoir which could not be swept by normal water. The field pilot test in Changqing oilfield of ultra-low permeability reservoir had the characteristics of increasing fluid, increasing oil and lowering the rate of decline. The effect of enhanced oil recovery by waterflooding was observed for the first time in Changqing oilfield of ultra-low permeability reservoir. The theory of waterflooding in low-permeability reservoir was developed.

Keywords: nano; oil-displacement agent; nano-sized water; nano-sized oil; recovery factor; waterflooding; Changqing oilfield