

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2021016

引用格式: 雷天猛, 王秀军, 王姗姗, 等. 纳米二氧化硅改性聚合物的油藏适用性评价与微观驱油效果研究 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 107-112.

LEI Tianmeng, WANG Xiujun, WANG Shanshan, et al. Research on reservoir applicability evaluation and micro oil flooding effect of a nano-silica modified polymer [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(1): 107-112.

纳米二氧化硅改性聚合物的油藏适用性 评价与微观驱油效果研究

雷天猛¹, 王秀军^{2,3}, 王姗姗^{2,3}, 曹 杰¹

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 3. 中海石油(中国)有限公司北京研究中心, 北京 100028)

摘 要: 为增强驱油用聚合物的油藏适用性, 进一步提高原油采收率, 评价了一种具有纳米颗粒/聚合物复合结构的纳米二氧化硅改性聚合物的溶液特性及其驱油效果。在温度 90 ℃、矿化度 20 000 mg/L 条件下, 利用 Brookfield 黏度计和安东帕高温高压流变仪 MCR, 评价了纳米二氧化硅改性聚合物与 2 种未改性聚合物溶液性能的差异; 通过岩心驱替试验, 分析了上述 3 种聚合物的驱油效果; 通过微观驱油试验, 观察了孔隙模型注入 3 种聚合物前后原油的分布情况。试验得出, 由于纳米二氧化硅改性聚合物分子间相互作用更强, 分子间网络具有更好的形变恢复能力, 其增黏、抗温、抗盐、抗剪切和抗老化等性能与其他 2 种聚合物相比均有大幅提高。微观驱油效果研究发现, 纳米二氧化硅改性聚合物可将采收率提高 21 百分点, 高于支化聚合物 (13 百分点) 和线型聚合物 (9 百分点)。微观驱油效果研究结果表明, 纳米二氧化硅改性聚合物可以改善多孔介质的非均质性, 能大幅减少多孔介质中孤岛状油珠和长条状剩余油的数量, 显著降低残余油饱和度。

关键词: 改性纳米二氧化硅; 聚合物驱; 油藏适用性; 提高采收率; 微观驱油; 驱油效果

中图分类号: TE357.46⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)01-0107-06

Research on Reservoir Applicability Evaluation and Micro Oil Flooding Effect of a Nano-Silica Modified Polymer

LEI Tianmeng¹, WANG Xiujun^{2,3}, WANG Shanshan^{2,3}, CAO Jie¹

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, 266580, China; 2. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100028, China; 3. Beijing Research Center, CNOOC (China) Co., Ltd., Beijing, 100028, China)

Abstract: The solution characteristics and oil displacement effect of a nano-silica modified polymer with nanoparticle-polymer composites were evaluated to enhance the applicability of oil displacement polymers in reservoirs and further improve oil recovery. The performance differences between different polymer solutions, including a nano-silica modified polymer and two unmodified polymers, were evaluated by Brookfield viscometer and HTHP Anton Paar rheometer at 90 °C and 20,000 mg/L of salinity. The oil displacement effects of above polymers were analyzed by core flooding experiments. The distributions of crude oil in the pore model before and after flooding with three kinds of polymers were observed through micro oil flooding experiments. The experimental results showed that the molecular network had better performance in deformation recovery because the interaction between the molecules of nano-silica modified polymer was stronger. Compared with the other two polymers, the nano-silica modified polymer presented large improvement in increasing viscosity, improving temperature resistance, salt resistance, enhancing shearing

收稿日期: 2020-06-30; 改回日期: 2020-12-03。

作者简介: 雷天猛 (1994—), 男, 陕西合阳人, 2014 年毕业于西安石油大学石油工程专业, 石油与天然气工程专业在读硕士研究生, 主要从事丙烯酸类聚合物驱油提高采收率研究。E-mail: 1310395870@qq.com。

通信作者: 王秀军, wangxj89@cnooc.com.cn; 曹杰, jcao@upc.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目“驱油用可控降解链球型纳米流体: 制备-构像-综合性能平衡性调控机制研究”(编号: 51874347) 和山东省自然科学基金项目“基于两亲纳米 SiO₂/聚合物的耐温抗盐驱油体系构建及机理”(编号: ZR2019MEE037) 联合资助。

endurance and aging stability, and increased the oil recovery ratio by 21 percentage points, which was greater than that of branched polymer (13 percentage points) and that of linear polymer (9 percentage points) respectively. So, the nano-silica modified polymer can effectively alleviate the heterogeneity of porous media, greatly reduce the number of island-like oil beads and long strip-like remaining oil in the porous media, and significantly decrease the saturation of residual oil.

Key words: modified nano-silica; polymer flooding; reservoir adaptability; enhanced oil recovery; micro oil flooding; flooding effect

聚合物驱是油田三次采油中一种重要的驱油方式,能够有效提高原油采收率。现阶段常用相对分子质量 2 000 万以上的丙烯酰胺类聚合物,但受限于相对分子质量大小和分子链结构,其综合性能较差,无法适应高温、高盐、低孔和低渗等复杂油藏,影响了原油采收率的提高^[1-2]。为解决该问题,一般会在聚合物分子主链上引入具有耐温、抗盐、亲水或疏水基团,提高聚合物的驱油性能^[3-5]。但是,该方式往往会增加成本或导致聚合物相对分子质量减小^[6]。由于纳米二氧化硅比表面积大,并具有抗高温、抗高盐的优点,将其表面修饰成氨基,得到表面阳离子化的纳米颗粒,一方面可提高纳米颗粒的分散稳定性;另一方面可通过静电作用、氨基交换等方式增强纳米颗粒和聚合物的相互作用、纳米颗粒/聚合物复合结构的稳定性^[7-8]。由此可见,将纳米颗粒引入聚合物,可以提高聚合物的油藏适用性和驱替液的波及效率,在多孔介质中建立较大的阻力系数和残余阻力系数,提高三次采油的驱油效率^[8-9]。因此,为了提高聚合物的油藏适用性,笔者评价了纳米二氧化硅改性聚合物、支化聚合物、线型聚合物的增黏、抗温、抗盐、抗剪切和抗老化性能;通过物理驱油试验和微观驱油试验,研究了注入 3 种聚合物前后孔隙模型中的原油分布情况和原油采收率的提高情况,并分析了纳米二氧化硅改性聚合物具有较好油藏适用性的机理。

1 油藏适用性评价方法

首先在丙烯酰胺(AM)和 2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)共聚过程中加入氨基化纳米二氧化硅,得到具有纳米颗粒/聚合物复合结构的纳米二氧化硅改性聚合物^[10];然后合成了支化聚合物和线型聚合物;最后将 3 种聚合物配制成质量浓度 5 000 mg/L 的聚合物母液,将其稀释至目标浓度,并进行了性能评价试验,以评价其油藏适用性。

1.1 试验材料及装置

纳米二氧化硅改性聚合物、支化聚合物、线型聚

合物,实验室合成^[10];模拟水,矿化度 20 000 mg/L, Ca^{2+} 质量浓度 1 350 mg/L, Mg^{2+} 质量浓度 650 mg/L; Brook-filed 黏度计;安东帕高温高压流变仪 MCR; Waring 搅拌器;西林瓶;烘箱;30.0 cm×4.5 cm×4.5 cm 的人造非均质反韵律方岩心,渗透率 750 mD/1 500 mD/2 250 mD,液测渗透率 1 530 mD,孔隙度 39.3%;物理模拟驱油试验装置;8.0 cm×8.0 cm 的玻璃激光刻蚀模型,渗透率 1 500 mD;微观模拟驱油试验装置。

1.2 试验方法

1)基本性能评价及老化稳定性测试。用模拟水配制聚合物母液,再进行稀释,利用 Brookfild 黏度计测试纳米二氧化硅改性聚合物、支化聚合物、线型聚合物等 3 种聚合物的增黏性、抗温性、抗盐性、抗剪切性和抗老化性。试验温度 90 ℃。

2)驱油效果测试。将岩心饱和原油,用模拟水以 1 mL/min 的注入速度驱至含水率大于 98%,注入 0.3 倍孔隙体积的质量浓度 2 000 mg/L 的聚合物溶液,再次用模拟水驱至含水率达到 100%。试验温度 90 ℃。

3)微观驱油测试。玻璃刻蚀模型饱和原油后,模拟水以 0.015 mL/min 的注入速度驱至不再有原油流出,注入 0.5 倍孔隙体积的质量浓度 2 000 mg/L 的聚合物溶液,再次用模拟水驱至不再有原油流出,观察聚合物驱前后玻璃刻蚀模型中原油的分布情况。

2 油藏适用性评价结果分析

利用上述油藏适用性评价方法,对 3 种聚合物溶液进行了增黏、抗温、抗盐、抗剪切和抗老化性能评价试验,分析探讨物理驱油试验效果和微观驱油试验效果。

2.1 增黏性

纳米二氧化硅改性聚合物、支化聚合物和线型聚合物溶液黏度与其质量浓度的关系如图 1 所示。

从图 1 可以看出,随着聚合物质量浓度升高,3 种聚合物溶液的黏度呈先缓慢升高、再迅速升高的趋势。在同一条件下,聚合物的质量浓度从 1 500 mg/L 升至 3 500 mg/L 时,纳米二氧化硅改性聚合物溶液

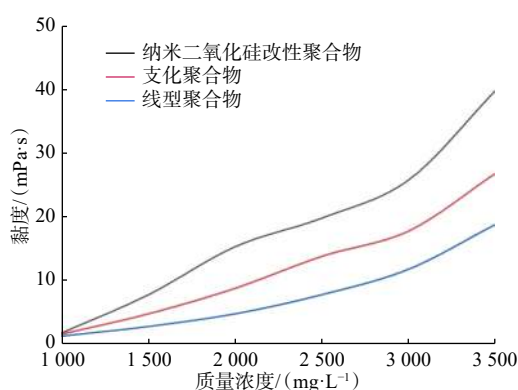


图 1 纳米二氧化硅改性聚合物、支化聚合物和线型聚合物溶液黏度与其质量浓度的关系

Fig.1 The relationship between viscosity and mass concentration for nano-silica modified polymer, branched polymer and linear polymer solution

的黏度升高了 32 mPa·s, 而支化聚合物和线型聚合物溶液的黏度分别升高了 22 和 16 mPa·s, 由此可见, 随着质量浓度升高, 纳米二氧化硅改性聚合物具有更好的增黏性。分析认为, 这是因为在纳米二氧化硅改性聚合物溶液中, 纳米颗粒可以通过氢键、静电作用等与不同聚合物分子产生相互作用, 随着质量浓度升高, 这种相互作用显著增强, 从而使分子间网络结构增强、溶液黏度升高更为明显^[7,10]。

2.2 抗温性

纳米二氧化硅改性聚合物、支化聚合物和线型聚合物溶液黏度与温度的关系如图 2 所示。

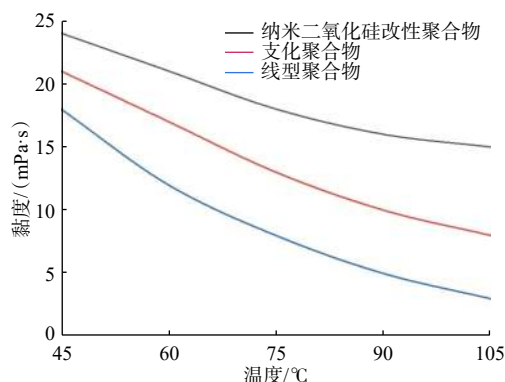


图 2 纳米二氧化硅改性聚合物、支化聚合物和线型聚合物溶液黏度与温度的关系

Fig.2 The relationship between viscosity and temperature for nano-silica modified polymer, branched polymer and linear polymer solution

从图 2 可以看出, 随着温度逐渐升高, 3 种聚合物溶液的黏度均呈逐渐降低趋势。相同条件下, 当温度从 45 °C 升至 105 °C 时, 纳米二氧化硅改性聚合物溶液黏度的保留率为 66%, 支化聚合物和线型聚

合物溶液黏度的保留率分别为 39% 和 23%。高温下, 纳米二氧化硅改性聚合物溶液黏度的保留率比线型聚合物和线型聚合物高, 这是因为纳米颗粒与聚合物之间的静电作用强于聚合物分子间的氢键、范德华力作用, 因此聚合物与纳米颗粒形成的网络结构受温度的影响较小, 即纳米二氧化硅改性聚合物具有更好的抗温性能^[11-12]。

2.3 抗盐性

纳米二氧化硅改性聚合物、支化聚合物和线型聚合物溶液黏度与矿化度的关系如图 3 所示。

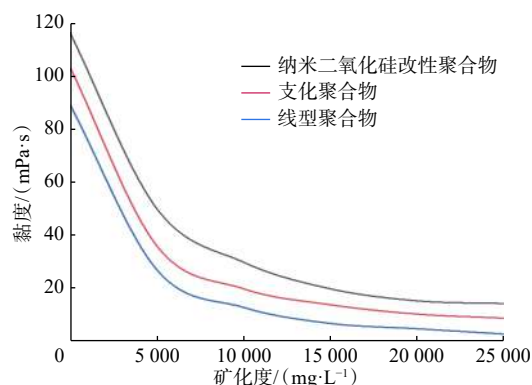


图 3 纳米二氧化硅改性聚合物、支化聚合物和线型聚合物溶液黏度与矿化度的关系

Fig.3 The relationship between viscosity and salinity for nano-silica modified polymer, branched polymer and linear polymer solution

从图 3 可以看出, 随着矿化度增大, 3 种聚合物溶液的黏度均呈先迅速降低、再缓慢降低的趋势。在相同条件下, 模拟水矿化度从 0 升至 25 000 mg/L 时, 纳米二氧化硅改性聚合物溶液黏度的保留率为 13%, 支化聚合物和线型聚合物溶液黏度的保留率分别为 9% 和 5%。在高矿化度下, 纳米二氧化硅改性聚合物溶液黏度的保留率比支化聚合物高 4 个百分点, 比线型聚合物高 8 个百分点, 这是因为纳米颗粒与聚合物分子可以形成无机/有机复合结构, 有利于抑制聚合物分子在高浓度盐离子下的蜷曲, 提高聚合物分子的刚性, 有助于分子间形成网络结构。此外, 纳米颗粒与聚合物分子之间的氢键受盐离子的影响较小, 高浓度盐离子条件下纳米颗粒仍然可以与聚合物分子相互作用增强分子网络结构的强度。因此, 纳米二氧化硅改性聚合物具有更好的抗盐性能^[13-14]。

2.4 抗剪切性

纳米二氧化硅改性聚合物、支化聚合物和线型聚合物溶液黏度与剪切时间的关系如图 4 所示。试验时, 聚合物溶液用 Waring 搅拌器 (1 档) 分别剪切 0~30 s, 测试剪切前后的黏度。

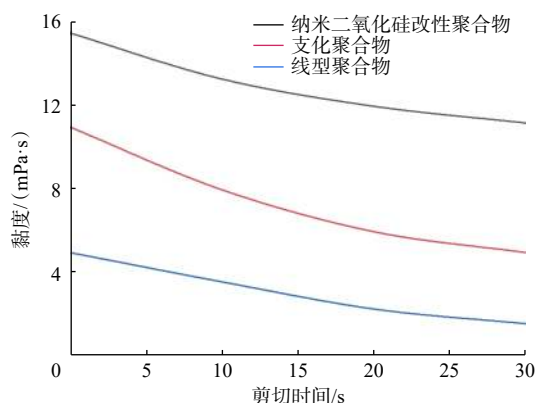


图4 纳米二氧化硅改性聚合物、支化聚合物和线型聚合物溶液黏度与剪切时间的关系

Fig. 4 The relationship between viscosity and the shearing time for nano-silica modified polymer, branched polymer and linear polymer solution

从图4可以看出,随着剪切时间增长,3种聚合物溶液的黏度均呈先迅速降低、后趋于平缓变化趋势。相同条件下,剪切30 s时,纳米二氧化硅改性聚合物溶液黏度的保留率为72%,支化聚合物和线型聚合物溶液黏度的保留率分别为51%和38%。纳米二氧化硅改性聚合物表现出更好的抗剪切性能,这是因为纳米颗粒具有很好的抗剪切性,经过剪切仍能保持其尺寸、形貌和表面化学结构;此外,纳米颗粒与聚合物存在静电、氢键等相互作用,分子网络结构受到剪切破坏后能够部分恢复^[10,15]。

2.5 抗老化性

纳米二氧化硅改性聚合物、支化聚合物和线型聚合物溶液黏度与老化时间的关系如图5所示。

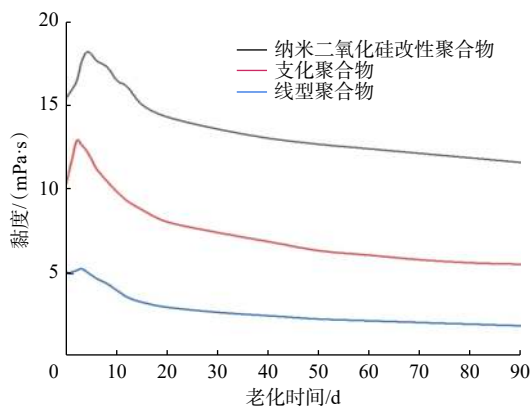


图5 纳米二氧化硅改性聚合物、支化聚合物和线型聚合物溶液黏度与老化时间的关系

Fig.5 The relationship between viscosity and aging time for nano-silica modified polymer, branched polymer and linear polymer solution

从图5可以看出,随着老化时间增长,3种聚合物溶液的黏度均呈先短暂升高、后逐渐降低的趋势。相同条件下老化90 d后,纳米二氧化硅改性聚合物溶液黏度的保留率为74%,支化聚合物和线型聚合物溶液黏度的保留率分别为52%和39%。纳米二氧化硅改性聚合物溶液黏度老化保留率比支化聚合物、线型聚合物分别高22和35个百分点,这是因为在纳米颗粒/聚合物复合结构中,纳米颗粒降低了聚合物分子受自由基、氢氧根和盐离子进攻的概率,抑制了聚合物分子的水解和化学降解,保护了聚合物分子的主链;此外,老化过程中,氨基和酰胺基之间的氨基发生交换反应,形成了纳米颗粒与聚合物间的共价接枝,有利于增强分子网络结构的强度。因此,纳米二氧化硅改性聚合物表现出更好的抗老化性能^[10,16]。

2.6 物理驱油效果

采收率/含水率与纳米二氧化硅改性聚合物、支化聚合物和线型聚合物溶液注入量的关系如图6所示。

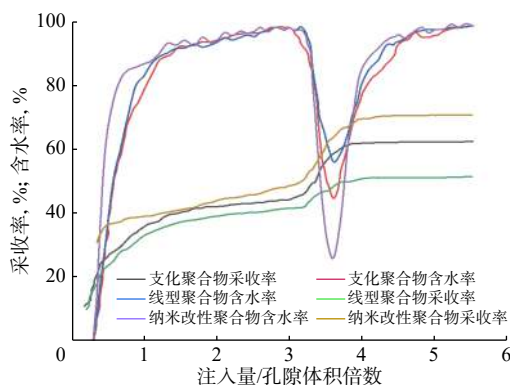


图6 采收率/含水率与纳米二氧化硅改性聚合物、支化聚合物和线型聚合物溶液注入量的关系

Fig.6 The relationship between oil recovery ratio or water cut and injected volume of nano-silica modified polymer, branched polymer and linear polymer solution

从图6可以看出,物理模拟驱油试验装置的岩心注入3种聚合物溶液后,含水率均呈下降趋势,其中注入纳米二氧化硅改性聚合物溶液的采出液含水率下降幅度最大,最低降至26%;相同条件下,注入支化聚合物和线型聚合物溶液的采出液含水率最低降至44%和58%。分析认为,这是因为注入水不容易沿反韵律岩心下部低渗透层流向岩心出口端,导致岩心垂向水洗厚度小,水驱采收率低,采出液含水率高^[17]。相同条件下,纳米二氧化硅改性聚合物对水的稠化作用使水相黏度大幅增大,能够抑制驱油体系沿高渗透层突进,有效增大波及体积,提高

原油采收率,并使采出液含水率显著降低^[16-17]。分析采收率曲线发现,纳米二氧化硅改性聚合物使采收率提高了 21 个百分点,而支化聚合物和线型聚合物分别提高了 13 个百分点和 9 个百分点。纳米二氧化硅改性聚合物提高原油采收率的幅度较大,这是因为纳米二氧化硅改性聚合物的纳米颗粒/聚合物复合结构促进了分子间网络结构的形成,提高了体系的黏度和黏弹性^[16]。此外,纳米颗粒自身具有一定降低油水界面张力的能力,通过纳米颗粒的牵引,聚

合物分子更倾向于在油水界面聚集,在增大波及体积的同时,能够将一些细小孔隙和盲端处的剩余油驱替出来^[10]。因此,相对于支化聚合物和线型聚合物,纳米二氧化硅改性聚合物的物理驱油效果更好。

2.7 微观驱油效果

通过微观驱油试验,得到了 3 种聚合物注入前后玻璃刻蚀模型中原油的变化情况,结果如图 7 所示(图 7 中:1, 2, 3 为孤岛状油珠;a, b, c 为长条状剩余油;A, B, C 为油丝)。

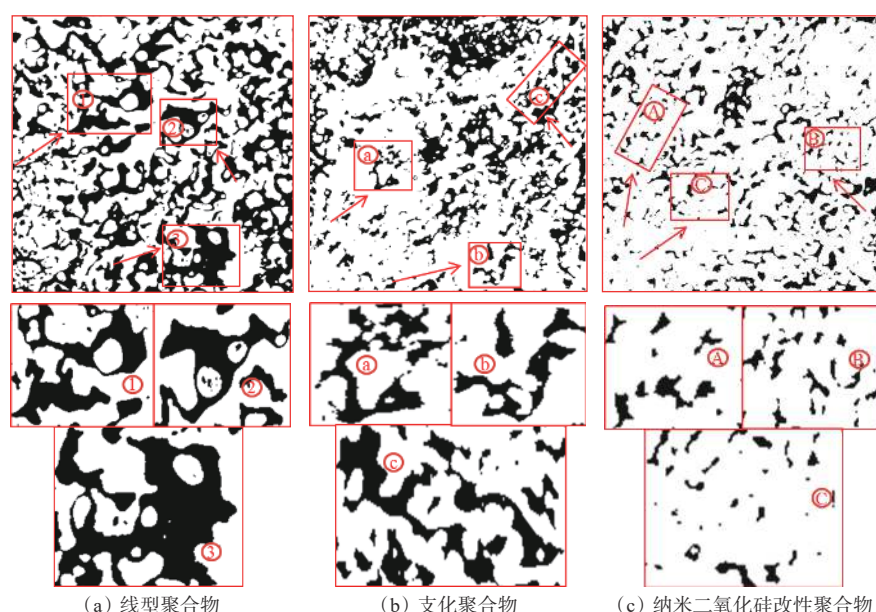


图 7 线型聚合物、支化聚合物和纳米二氧化硅改性聚合物的微观驱油效果对比

Fig.7 Comparison of micro oil flooding results among nano-silica modified polymer, branched polymer and linear polymer

由图 7 可知:注入线型聚合物溶液后,玻璃刻蚀模型中的剩余油以孤岛状油珠为主;注入支化聚合物溶液后,玻璃刻蚀模型中的剩余油以长条状剩余油为主,伴随有部分油珠;注入纳米二氧化硅改性聚合物溶液后,玻璃刻蚀模型中的剩余油以油丝为主,同时存在部分长条状剩余油。分析认为,这是由于纳米二氧化硅改性聚合物分子间可形成更强的网络结构,具有更好的增黏性和黏弹性,驱替过程中,后续流体对前缘流体不仅有推动作用,而且还有拉伸、拽动作用^[16]。由此可知,纳米二氧化硅改性聚合物能够显著降低残余油饱和度。

3 结论与建议

1)在聚合物中引入纳米颗粒能有效抑制聚合物

的水解和降解,形成分子间网络结构,降低油水界面张力。与支化聚合物和线型聚合物相比,纳米二氧化硅改性聚合物的增黏性、抗温性、抗盐性、抗剪切性能和抗老化性能均有不同程度的提高,原油采收率至少提高了 8 个百分点。因此,纳米二氧化硅改性聚合物具有更好的油藏适用性,在高温高盐油藏具有较好的应用前景。

2)微观驱油效果研究结果表明,纳米二氧化硅改性聚合物能有效扩大波及体积,提高洗油效率。注入其溶液后,孔隙中的剩余油主要以油丝为主,并伴有部分长条状,大幅度减少了孤岛状油珠和长条状剩余油的数量,能显著降低残余油饱和度,提高原油采收率。

3)建议采用冷冻刻蚀扫描电镜、注入性及传导性、核磁共振成像,对纳米二氧化硅改性聚合物的增黏和驱油机理及动态进行进一步研究,以便全面

深入了解纳米二氧化硅改性聚合物有效增强聚合物油藏适用性的原理。

参 考 文 献

References

- [1] 孙玉丽, 钱晓琳, 吴文辉. 聚合物驱油技术的研究进展 [J]. 精细石油化工进展, 2006, 7(2): 26–29.
SUN Yuli, QIAN Xiaolin, WU Wenhui. Research progress in polymer flooding for enhanced oil recovery[J]. *Advances in Fine Petrochemicals*, 2006, 7(2): 26–29.
- [2] 徐辉, 孙秀芝, 韩玉贵, 等. 超高分子聚合物性能评价及微观结构研究 [J]. 石油钻探技术, 2013, 41(3): 114–118.
XU Hui, SUN Xiuzhi, HAN Yugui, et al. Performance evaluation and microstructure study of ultra high molecular polymer[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013, 41(3): 114–118.
- [3] 丁艳, 朱竹. AM/AMPS/DMDAAC/OAM 水溶性疏水缔合两性共聚物的合成及其性能 [J]. 石油化工, 2013, 42(9): 973–978.
DING Yan, ZHU Zhu. Synthesis and properties of water-soluble hydrophobically associating ampholytic copolymers AM/AMPS/DMDAAC/OAM[J]. *Petrochemical Technology*, 2013, 42(9): 973–978.
- [4] 李欣, 谢彬强, 赵林. 新型耐温抗盐聚合物增黏剂的制备及评价 [J]. 石油化工, 2018, 47(6): 595–599.
LI Xin, XIE Binqiang, ZHAO Lin. Synthesis and evaluation of new-resistant and salt-tolerant polymer viscosifier[J]. *Petrochemical Technology*, 2018, 47(6): 595–599.
- [5] 王东平, 韩宇豪, 谭佳文, 等. 一种四元丙烯酸胺共聚物的合成及性能 [J]. 石油化工, 2019, 48(11): 1146–1150.
WANG Dongping, HAN Yuhao, TAN Jiawen, et al. Synthesis and properties of tetra-acrylamide copolymer[J]. *Petrochemical Technology*, 2019, 48(11): 1146–1150.
- [6] 姜海峰, 王德民, 夏惠芬. 梳形聚合物溶液的流变性及其驱油效果分析 [J]. 大庆石油学院学报, 2008, 32(4): 61–65.
JIANG Haifeng, WANG Demin, XIA Huifen. Rheological properties of comb polymer solution and analysis of oil displacement effect[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2008, 32(4): 61–65.
- [7] MAURYA N K, KUSHWAHA P, MANDAL A. Studies on interfacial and rheological properties of water soluble polymer grafted nanoparticle for application in enhanced oil recovery[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2017, 70: 319–330.
- [8] ZHENG Chao, CHENG Yamin, WEI Qingbo, et al. Suspension of surface-modified nano-SiO₂ in partially hydrolyzed aqueous solution of polyacrylamide for enhanced oil recovery[J]. *Colloids & Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, 524: 169–177.
- [9] 于志省, 夏燕敏, 李应成. 耐温抗盐丙烯酸胺系聚合物驱油剂最新研究进展 [J]. 精细化工, 2012, 29(5): 417–424, 442.
YU Zhisheng, XIA Yanmin, LI Yingcheng. Newest research development of acrylamide based polymer flooding agent with temperature resistance and salt tolerance[J]. *Fine Chemicals*, 2012, 29(5): 417–424, 442.
- [10] CAO Jie, SONG Tao, ZHU Yuejun, et al. Application of amino-functionalized nanosilica in improving the thermal stability of acrylamide-based polymer for enhanced oil recovery[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(1): 246–254.
- [11] 秦文龙, 张志强, 侯宝东, 等. 纳米技术在提高原油采收率方面的应用新进展 [J]. 断块油气田, 2013, 20(1): 10–13.
QIN Wenlong, ZHANG Zhiqiang, HOU Baodong, et al. Advance of nanotechnology application in enhancing oil recovery[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2013, 20(1): 10–13.
- [12] PONNAPATI R, KARAZINCIR O, DAO E, et al. Polymer-functionalized nanoparticles for improving waterflood sweep efficiency: characterization and transport properties[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 50(23): 13030–13036.
- [13] 杨莉, 柯扬船. 聚丙烯酰胺纳米复合材料的合成与溶液特性 [J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(6): 11–14.
YANG Li, KE Yangchuan. Synthesis and solution properties of polyacrylamide nanocomposites[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2011, 27(6): 11–14.
- [14] KE Yangchuan, WEI Guangyao, WANG Yi. Preparation, morphology and properties of nanocomposites of polyacrylamide copolymers with monodisperse silica[J]. *European Polymer Journal*, 2008, 44(8): 2448–2457.
- [15] 曹绪龙, 刘坤, 韩玉贵, 等. 耐温抗盐缔合聚合物的合成及性能评价 [J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(2): 10–14.
CAO Xulong, LIU Kun, HAN Yugui, et al. Synthesis and performance evaluation of temperature- and salt-resistant associative polymers[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(2): 10–14.
- [16] CAO Jie, SONG Tao, ZHU Yuejun, et al. Aqueous hybrids of amino-functionalized nanosilica and acrylamide-based polymer for enhanced oil recovery[J]. *RSC Advances*, 2018(8): 38056–38064.
- [17] 王代流. 河流相沉积油藏聚合物驱油开发效果的影响因素 [J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(1): 62–65, 68.
WANG Dailiu. Influencing factors of the effect of polymer flooding production in oil reservoirs of fluvial facies sedimentary[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2009, 16(1): 62–65, 68.

[编辑 令文学]