

引用格式:元福卿,于群,陈兴锋,等.胜利油田高温高盐油藏化学驱提高采收率技术进展[J].油气地质与采收率,2024,31(5):199-208.

YUAN Fuqing, YU Qun, CHEN Xingfeng, et al. Progress in enhanced oil recovery technologies through chemical flooding in high-temperature and high-salinity reservoirs in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(5): 199-208.

胜利油田高温高盐油藏化学驱提高采收率技术进展

元福卿,于群,陈兴锋,郭淑凤,赵方剑,徐辉,李菲菲
(中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营257015)

摘要:胜利油田化学驱资源丰富,但由于储层非均质性强、油藏温度高、地层水矿化度高、钙镁离子含量高和原油黏度高等问题,化学驱技术实施难度较大。历经多年攻关,创建了高温高盐油藏化学驱理论,形成了聚合物驱、无碱二元复合驱、非均相复合驱和降黏复合驱等化学驱技术系列,解决了地层温度为85℃、地层水矿化度为30 000 mg/L、钙镁离子质量浓度为1 500 mg/L、地层原油黏度为1 000 mPa·s以内油藏大幅度提高采收率的难题。基础理论方面,阐明了“变形通过、液流转向、均衡驱替、调洗协同”的非均相复合驱提高采收率机理,取得了高黏油藏化学驱“黏弹性并重”与“大幅度降低黏附功”的重要认识。技术应用方面:针对海上油田大幅度提高采收率技术难题,研制了高效二元复合驱油体系,设计了全密闭配注工艺,形成了海上油田二元复合驱技术;针对聚合物驱后油藏与高温高盐油藏条件,发明了黏弹性颗粒驱油剂,研发了非均相复合驱油体系,创建并发展了非均相复合驱技术;针对高黏油藏,研发了高黏团聚聚合物和高效表面活性剂,研制了降黏复合驱油体系,形成了高黏油藏无碱二元复合驱技术。截至2023年10月,胜利油田高温高盐油藏化学驱技术已动用石油地质储量达 6.3×10^8 t,累积产油量为 7.701×10^4 t,累积增油量为 3.604×10^4 t,为胜利油田持续稳产、高质量发展提供了强力支撑。

关键词:化学驱;海上油田二元复合驱;非均相复合驱;高黏油藏化学驱;胜利油田

文章编号:1009-9603(2024)05-0199-10

DOI:10.13673/j.pgre.202405025

中图分类号:TE357.46

文献标识码:A

Progress in enhanced oil recovery technologies through chemical flooding in high-temperature and high-salinity reservoirs in Shengli Oilfield

YUAN Fuqing, YU Qun, CHEN Xingfeng, GUO Shufeng, ZHAO Fangjian, XU Hui, LI Feifei
(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC,
Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: Shengli Oilfield has abundant chemical flooding resources. However, the implementation of chemical flooding technologies is difficult due to strong reservoir heterogeneity, high reservoir temperature, high formation water mineralization, high calcium and magnesium ion content, and high crude oil viscosity. After years of research and development, the theory of chemical flooding for high-temperature and high-salinity reservoirs has been established, forming a series of chemical flooding technologies such as polymer flooding, alkali-free binary compound flooding, heterogeneous compound flooding, and viscosity-reducing compound flooding. These technologies have significantly enhanced oil recovery in reservoirs with a formation temperature of 85 °C, a formation water mineralization of 30 000 mg/L, a calcium and magnesium ion concentration of 1 500 mg/L, and a crude oil viscosity of 1 000 mPa·s. In terms of basic theory, the mechanism of heterogeneous compound flooding was elucidated with “deformation passage, fluid flow diversion, balanced displacement, and coordinated transfer and washing” to enhance oil recovery, and an

收稿日期:2024-05-11。

作者简介:元福卿(1971—),男,江西崇仁人,高级工程师,博士,从事化学驱提高采收率研究与应用。E-mail:13589976531@163.com。

基金项目:中国石化重点科技项目“非均相复合驱大幅度提高采收率技术研究与应用”之“非均相复合驱技术应用与示范”(P23246)。

essential understanding of “simultaneously increasing viscosity and elasticity” and “significantly reducing adhesion work” was obtained during chemical flooding in high-viscosity reservoirs. In terms of technical application, in response to the technical difficulties of significantly enhancing oil recovery in offshore oilfields, an efficient binary compound oil displacement system was constructed, and a fully enclosed injection process was designed, forming a binary compound flooding technology for offshore oilfields. For reservoirs after polymer flooding and high-temperature and high-salinity reservoirs, a viscoelastic particle oil displacement agents were invented, and a heterogeneous compound flooding system was constructed. In addition, heterogeneous compound flooding technology was developed. For high-viscosity reservoirs, highly viscoelastic polymers and efficient surfactants were developed, and a viscosity-reducing compound flooding system was constructed, forming an alkali-free binary compound flooding technology. As of October 2023, the chemical flooding technologies have achieved the produced geological petroleum reserve of 6.3×10^8 t, an accumulated oil production of $7\,701 \times 10^4$ t, and an accumulated oil increase of $3\,604 \times 10^4$ t for high-temperature and high-salinity reservoirs in Shengli Oilfield, providing significant support for the sustained and high-quality development.

Key words: chemical flooding; binary compound flooding for offshore oilfields; heterogeneous compound flooding; chemical flooding in high-viscosity reservoirs; Shengli Oilfield

胜利油田适合化学驱石油地质储量约为 21.86×10^8 t, 资源丰富。由于储层非均质性强、油藏温度高、地层水矿化度高、钙镁离子含量高以及原油黏度高等问题, 实施化学驱难度大。20世纪90年代, 多家国际石油公司进行了可行性研究, 认为胜利油田不适合开展化学驱。经过胜利几代石油工作者潜心研究, 创建了高温高盐油藏化学驱理论, 形成了聚合物驱、无碱二元复合驱、非均相复合驱和降黏复合驱等化学驱技术系列, 解决了地层温度为 $85\text{ }^\circ\text{C}$ 、地层水矿化度为 $30\,000\text{ mg/L}$ 、钙镁离子质量浓度为 $1\,500\text{ mg/L}$ 、地层原油黏度为 $1\,000\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 以内油藏大幅度提高采收率难题。截至2023年10月, 胜利油田化学驱已动用石油地质储量为 6.3×10^8 t, 累积产油量为 $7\,701 \times 10^4$ t, 累积增油量为 $3\,604 \times 10^4$ t, 成为老油田大幅度提高采收率的主导技术之一^[1]。

未来胜利油田化学驱面临着接替阵地油藏温度更高、地层水矿化度更高、原油黏度更高的挑战。围绕更为苛刻的油藏条件, 发展高温高盐油藏化学驱理论, 攻关高温高盐油藏化学驱技术, 对保持胜利油田乃至中国石化产量稳定、保障国家能源安全具有重要意义^[2]。

1 高温高盐油藏化学驱理论

针对聚合物驱后油藏非均质性更强、剩余油分布更分散等特点, 胜利油田研发了多孔介质中封堵大孔喉且能变形运移的黏弹性颗粒驱油剂(PPG), 创建了非均相复合驱提高采收率方法, 揭示了非均相复合驱提高采收率机理。

1.1 非均相复合驱提高采收率机理

传统架桥理论认为, 大于 $1/3$ 孔喉直径的刚性

颗粒在孔喉处架桥堵塞, 无法运移^[3]。PPG并非刚性颗粒, 其多孔介质中的运移特征以及驱油机理亟需深入研究。基于理论分析与实验研究, 深化了非均相复合驱提高采收率机理认识。

变形通过采用 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的玻璃刻蚀模型, 将模型抽真空后饱和水, 以 0.15 mL/min 的注入速度注入质量浓度为 $2\,000\text{ mg/L}$ 的染色 PPG 悬浮液, 观察 PPG 在孔喉中的运移特征。实验结果(图1, 图2)^[4]表明, PPG 注入过程中首先在孔喉处封堵, 造成该处压力升高; 当压力升高到一定程度时, PPG 变形通过孔喉, 导致局部驱动压差明显变化, 宏观上表现为注入压力呈锯齿状变化, 从而显示出“堵-驱”结合的特点。

液流转向非均相复合驱油体系具有良好的液流转向能力, 可以有效改善油藏非均质性。室内采用直径为 2.5 cm 、长度为 30 cm 、渗透率分别为 1.0 和 5.0 D 的双管填砂模型进行了非均相复合驱非均质能力调整实验。由图3可以看出: 聚合物驱调整非均质能力有限, 且后续水驱阶段基本失效; 注入非均相复合驱油体系后, 高、低渗透管的分流量迅速改善, 低渗透管产液量明显上升; 后续水驱阶段, 非均相复合驱油体系对扩大低渗透管的波及体积持续有效, 产生了液流转向作用, 有效地开发低渗透管, 实现大幅度提高采收率^[5]。

均衡驱替采用 $104\text{ mm} \times 75\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$ 的可视化填砂模型, 将该模型平行划分为4个区域, 高、低渗透条带依次间隔, 渗透率级差为 2.9 , 观察注入过程中 PPG 在模型中的分布。实验结果(图4)表明, 注入过程中, PPG 在非均质条带中能够较为均匀地推进。注入初期, PPG 优先进入高渗透条带, 随着注入量的增加, PPG 在高渗透条带的孔喉处暂堵, 流动阻力增大, 导致后续流体转向低渗透条带;

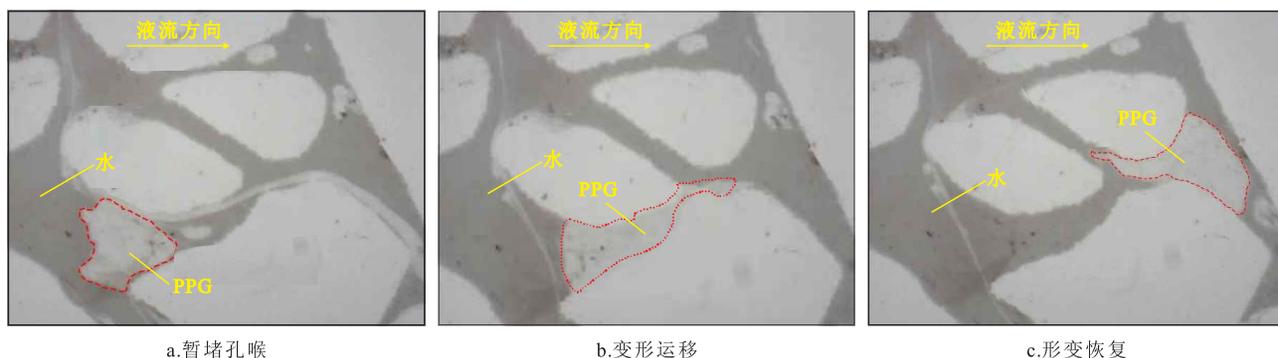


图1 PPG注入过程中在孔喉处堆积运移效果

Fig.1 Accumulation and migration effect of PPG during injection at pore throat

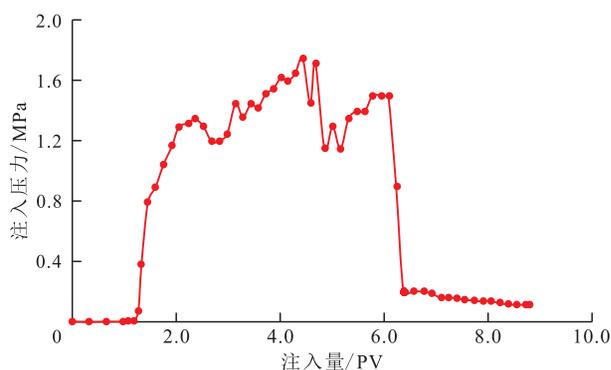


图2 PPG在多孔介质中注入压力传递曲线

Fig.2 Pressure transmission curve of PPG during injection in porous media

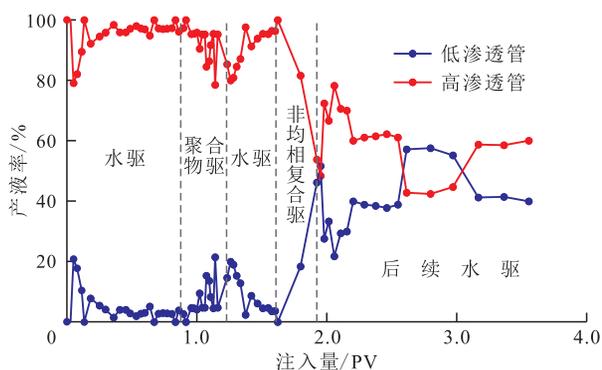


图3 聚合物驱后非均相复合驱油体系分流率曲线

Fig.3 Flow rate curve of heterogeneous compound flooding system after polymer flooding

由于PPG具有一定的黏弹性,当压力升高至一定程度时,暂堵的PPG能够变形通过孔喉,该处压力下降。整个注入过程中,PPG不断通过“堵塞-压力升高-变形通过”的方式在不同渗透率条带中进行交替封堵,扩大波及体积,使PPG能够较为均匀地推进,从而改善了平面非均质性^[6-7]。

调洗协同 非均相复合驱油体系由PPG、聚合物和表面活性剂组成。由可视化物理模拟实验结果可知,聚合物驱后表面活性剂驱、聚合物驱后聚合物驱、聚合物驱后PPG驱、聚合物驱后非均相复合驱4种方式提高采收率幅度分别为0.65%、3.97%、6.26%和15.09%,非均相复合驱油体系各组

分之间具有协同增效作用,其提高采收率幅度比各单剂提高采收率之和高达4.21%,其中调洗协同作用占比为28%。由于聚合物线性链与PPG支化链相互缠结,强化了网络结构,从而提高了非均相复合驱油体系的黏弹性;同时,PPG在孔喉处暂堵时,导致局部驱替压力增大,表面活性剂可转向进入小孔喉中,扩大波及能力的同时强化了洗油性能,从而实现大幅度提高采收率^[8]。

1.2 高黏油藏化学驱提高采收率机理新认识

传统化学驱以“增黏降张力”为核心,解决了驱替相增黏与降低油水界面张力难题,实现了原油黏度小于150 mPa·s油藏大幅度提高采收率^[9]。对于

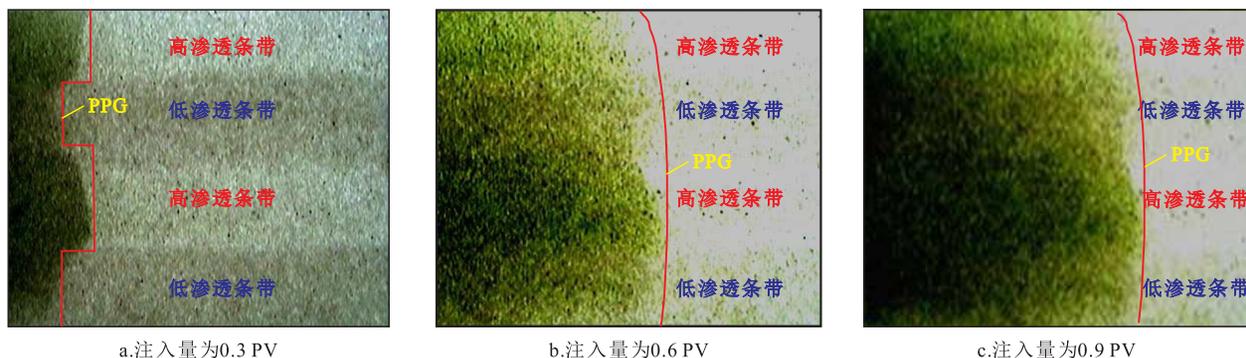


图4 不同注入量下PPG在非均质模型中的分布

Fig.4 Distribution of PPG in heterogeneous models under different injection volumes

更高原油黏度的油藏,仅靠增黏降张力无法使高黏原油启动和运移,驱油效果差,大幅度提高采收率亟需理论支撑。

1.2.1 黏弹性并重

聚合物驱油机理研究表明,抑制黏性指进仅与聚合物溶液黏度有关。但室内实验结果表明,对于地层原油黏度超过 150 mPa·s 的高黏油藏,仅靠增加聚合物黏度,克服黏性指进能力有限。

聚合物在地层孔喉运移过程中,除了有黏性作用,还有弹性作用。聚合物通过孔喉时,黏性产生的阻力与流速成正比,弹性产生的阻力与流速平方成正比,聚合物在孔喉处产生的阻力的表达式^[10-11]为:

$$\Delta P = b_0 \frac{\mu v}{D_A} + b_1 \frac{G' v^2}{D_A^2} \quad (1)$$

式中: ΔP 为孔喉处的局部阻力,Pa; b_0 和 b_1 均为系数; μ 为聚合物溶液黏度,Pa·s; v 为流速,m/s; D_A 为孔喉直径,m; G' 为弹性模量,Pa。

利用力学模拟方法对聚合物分子团通过孔喉进行受力分析,建立黏弹性流体的注入压力方程为:

$$p_{\text{注入}} = \left[2 \left(\frac{R_f}{R_p} \right)^3 - 0.002 \left(\frac{R_f}{R_p} \right)^2 + 0.07 \frac{R_f}{R_p} \right] \times (1.02G' + 0.27) \quad (2)$$

式中: $p_{\text{注入}}$ 为黏弹性流体的注入压力,Pa; R_f 为孔喉半径,m; R_p 为黏弹性流体力学半径,m。

由式(2)可以看出,弹性模量对于增加注入压力、抑制指进具有重要作用,因此高黏油藏化学驱油体系需要黏性和弹性并重^[12]。

1.2.2 降低黏附功

驱替相剥离岩石表面的原油时,必须克服原油与岩石表面的黏附功^[13],黏附功越低,原油越容易启动和剥离^[14-15]。高黏油藏条件下原油与岩石表面的黏附功是常规原油的10倍以上,仅靠降低界面张力无法有效将其从岩石表面剥离^[16]。通过理论分析与室内实验,研究了原油-石英表面黏附功与提高采收率和洗油率的关系。研究结果(图5)表明,当黏附功小于阈值时,洗油率和提高采收率幅度明显增大,因此降低黏附功是高黏油藏剥离和启动原油的关键^[17]。

2 高温高盐油藏化学驱技术

2.1 无碱二元复合驱技术

胜利埕岛油田动用石油地质储量为 3.2×10^8 t。

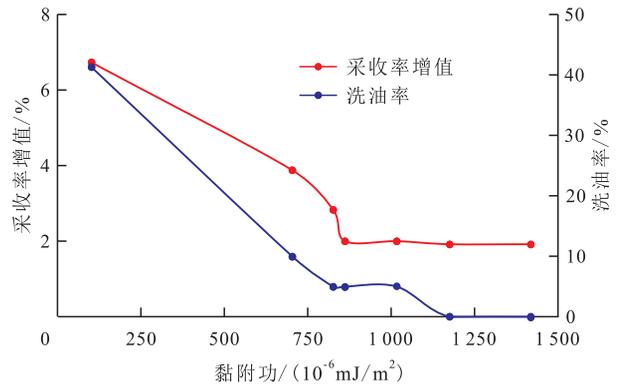


图5 黏附功与采收率增值和洗油率的关系

Fig.5 Relationships among adhesion work, enhanced oil recovery, and oil displacement efficiency

1993年投入开发,先后经历快速建产、调整上产和精细注采3个阶段,目前综合含水率为86.8%,采出程度为27.3%,处于中采出程度、高含水开发阶段。

经过30多年的开发,埕岛油田面临3个问题:

①含水率快速上升,导致运行成本急剧增加。②老区调整规模逐年下降,持续稳产面临极大挑战。③部分海洋工程设施服役时间过长,依靠水驱无法保证老区稳产,亟需转换开发方式提高油田采油速度和采收率^[18-22]。

化学驱可以大幅度提高采收率,但海上油田开展化学驱面临3个主要难题:①产出水配聚保黏难。海上油田产出水中 Fe^{2+} 和 S^{2-} 含量高。研究发现,在氧气的作用下,2种离子会加速氧化自由基的形成,使聚合物断链,导致聚合物溶液黏度大幅下降^[23]。②海上平台空间和载荷受限。陆上传统注聚系统包含储料罐、溶解配聚、母液熟化和增压注入等功能模块,占地面积大,难以照搬到海上平台。③注采井距和注采强度大,驱油体系适应性较差^[24]。海上油田注采井距大于300m,是陆上注采井距的2倍,高效且长效的驱油体系是良好开发效果的保障。

围绕海上油田化学驱面临的挑战,研制了高效化学驱油体系,设计了全密闭配注工艺,形成了适合海上油田的化学驱技术,矿场应用效果显著。

2.1.1 高效二元复合驱油体系研制

由于海上油田注采井距大,驱油剂运移时间长,目前陆上的化学驱油体系难以在海上油田推广应用。通过分子模拟与室内实验,优化亲水基和亲油基类型,调节亲水亲油平衡,设计了界面活性高、对油藏岩石吸附性较弱的阴非表面活性剂^[25],研制了适合海上油田的黏弹性高、热稳定性好、抗吸附性能强的海上复配驱油体系(图6)。油藏条件下海

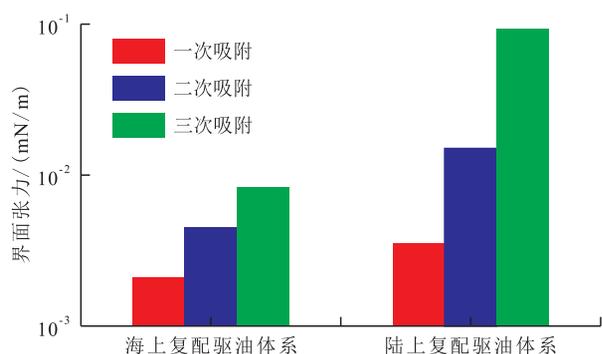


图6 海上和陆上复配驱油体系抗吸附测试结果对比
Fig.6 Comparison of anti-adsorption test results between offshore and onshore compound flooding systems

上复配驱油体系老化 180 d 后,黏度达 61 mPa·s (图 7),室内物理模拟实验提高采收率达 31.2%,同等条件下比常规聚合物驱油体系提高 10.7%,实现了海上油田大井距条件下驱油体系的长效性和有效性。

2.1.2 全密闭配注工艺设计

针对产出液中 Fe²⁺和 S²⁻含量高等难题,采用全过程氮气密闭配注工艺隔绝氧气,避免产生的自由基对聚合物溶液黏度的影响,现场母液黏度达到室内配制母液黏度的 95% 以上。针对海上平台空间受限的难题,将注聚系统集成成密闭制氮、上料储料、溶解配制和增压注入 4 个功能模块,占用面积仅为 600 m²,同等规模不足陆地的十分之一^[26];同时将配聚装备整合成三座标准集装箱,泵类设备集成撬,大幅降低施工难度,缩短建设周期,15 个月完成项目主体工程施工。

2.1.3 矿场应用

埕岛油田 22F 单元覆盖石油地质储量为 1 204 × 10⁴t,地层原油黏度为 30~70 mPa·s,渗透率为 1 500 mD,地层水矿化度为 9 229 mg/L,包含 22 口注入井和 57 口生产井,转化学驱前综合含水率为 90.7%,

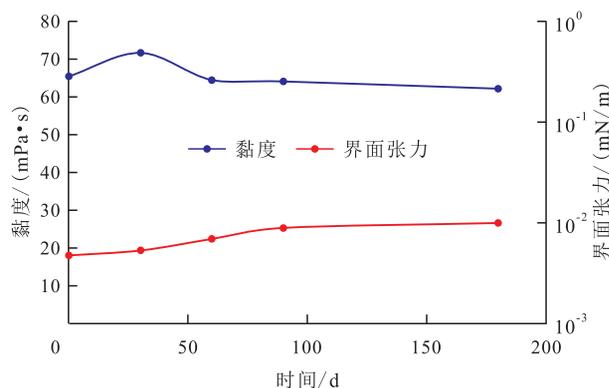


图7 老化 180 d 后海上复配驱油体系黏度和界面张力
Fig.7 Viscosity and interfacial tension of offshore compound system after 180 days of aging

采出程度为 26.8%。

2020 年 11 月开始投注聚合物,2021 年 8 月转二元段塞,井口黏度保持在 50 mPa·s 以上。截至 2023 年 12 月,日产油量最大增幅为 537 t/d,综合含水率最大降幅为 11%(图 8),培养了 1 口百吨井和 5 口日产油量为 50 t/d 的高产井,2023 年增油量为 27 × 10⁴ t,实现了海上化学驱的突破^[27]。

2.2 高温高盐油藏非均相复合驱技术

随着聚合物驱技术不断推广,聚合物驱后油藏提高采收率的问题日益受到关注。聚合物驱后油藏剩余油饱和度约为 50%,进一步提高采收率的物质基础丰富^[28],但是聚合物驱后油藏开采难度大,属于世界级难题。以孤岛油田中一区 Ng3 单元为例,该单元于 1994 年底开始实施聚合物驱,2006 年底结束,通过对密闭取心井资料分析发现,聚合物驱后油藏变异系数明显增大,非均质性更强,剩余油分布更加分散,且呈局部富集状态^[29-30]。这些油藏特点限制了成熟化学驱方法的应用。为解决这一问题,设计了具有波及能力强、洗油率高特点的非均相复合驱油体系^[31]。在孤岛油田中一区 Ng3 单元聚合物驱后非均质油藏开展先导试验,取得显著的应用效果。

2.2.1 PPG 研发

驱油用部分水解聚丙烯酰胺在非均质油藏中易发生窜流现象,而能改善油藏非均质性的交联聚合物凝胶无法在油藏中运移。结合聚合物驱后油藏特点,孙焕泉等研发了一种具有部分交联部分支化结构的 PPG^[32],其线性支化链可提高黏度,三维交联网状结构(图 9)可提高弹性,具有可变形、能运移的特点。

2.2.2 非均相复合驱油体系研发

优选与储层孔喉匹配的 PPG 是非均相复合驱油体系设计的关键。曹绪龙等建立了 PPG 与储层

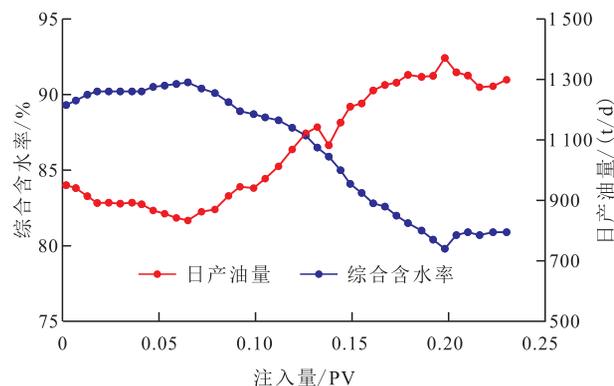


图8 埕岛油田 22F 单元化学驱生产曲线
Fig.8 Chemical flooding production curve in 22F unit of Chengdao Oilfield

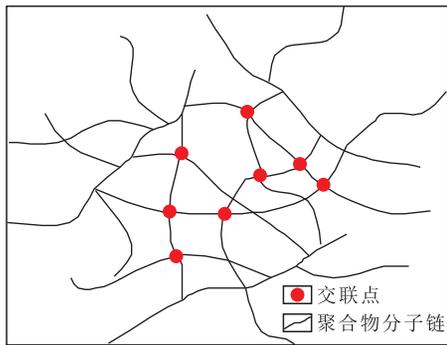


图9 PPG结构示意图

Fig.9 Schematic diagram of PPG structure

孔喉匹配关系模板^[33],实现了不同油藏条件下PPG个性化选择,指导了聚合物驱后油藏非均相复合驱油体系设计。以孤岛油田中一区Ng3单元为例,物理模拟实验结果表明,设计的非均相复合驱油体系(1 000 mg/L PPG+1 000 mg/L 聚合物+0.3%胜利石油磺酸盐+0.1%非离子表面活性剂1709)提高聚合物驱后油藏采收率幅度高达13.6%^[34]。

2.2.3 矿场应用

非均相复合驱先导试验区位于孤岛油田中一区Ng3单元东南部,含油面积为0.275 km²,石油地质储量为123×10⁴ t。试验区渗透率为1.5~2.5 D,有效厚度为14.2 m,非均质性强,渗透率变异系数为0.538,孔隙度为33%,地层原油黏度为46.3 mPa·s,地层水矿化度为5 923 mg/L,地层温度为70 ℃。先导试验前综合含水率为98.2%,采出程度为52.3%。

2010年10月先导试验区开始注前置段塞,2011年11月注非均相复合驱油体系主体段塞。实施非均相复合驱油体系后,矿场降水增油效果显著,日产油量由3.3 t/d上升至最高79 t/d,增加了24倍;综合含水率由98.2%最低降至81.3%,最大降幅为16.9%;提高采收率为8.5%,最终采收率为63.6%,突破了60%的采收率极限。

孤岛油田中一区Ng3单元非均相复合驱先导试验取得成功,分别在聚合物驱后油藏及高温高盐Ⅲ类油藏开展了推广应用,均取得良好的降水增油效果^[35-36],实现了非均相复合驱技术应用阵地的拓展。

2.3 高黏油藏降黏复合驱技术

胜利油田高黏油藏资源丰富,其中地层原油黏度为150~2 000 mPa·s的油藏资源为3.7×10⁸ t,但水驱采收率小于30%,综合含水率已达90%以上,需要探索能够大幅度提高采收率的新技术。

由于高黏油藏原油黏度大,水油流度比高,水驱指进现象严重,导致水驱波及系数低。常规化学

驱难以达到合理黏度。胜利油田经过持续攻关研究,提出了降黏复合驱的驱油方法,利用聚合物增加驱替相黏度,同时利用降黏驱油剂降低原油黏度和油水界面张力,实现扩大波及体积、提高洗油率的目的^[37]。

2.3.1 新型驱油剂研制

物理模拟和数值模拟结果表明,高黏原油条件下,驱替相黏度高于50 mPa·s,弹性模量高于100 mPa,才能有效抑制指进^[38]。通过优化引发体系和合成工艺,大幅提高分子链长度,合成了均聚型高黏弹聚合物,其长分子链之间产生更强的“捆绑和缠绕”作用,增黏性能比常规聚合物提高30%以上,弹性模量从40 mPa增至120 mPa,黏弹性大幅提升^[39-40]。

与吞吐降黏不同,降黏复合驱需要研发具有降黏功能的新型驱油用表面活性剂(简称降黏型驱油剂)。由于驱油过程中油水体积比不断变化,降黏型驱油剂需要在宽油水体积比范围内达到高效降黏,并须具有良好的界面活性。利用分子模拟方法研究化学降黏作用机制,发现表面活性剂通过乳化、分散作用降低胶质沥青质网络的聚集程度,减小胶质沥青质聚集体的尺寸来降黏^[41]。通过优化亲水基和亲油基类型,调节分子极性与大小,合成了兼具低界面张力和高效降黏功能的表面活性剂,油水体积比为2:8~8:2时,降黏率达到90%以上^[42]。

2.3.2 降黏复合驱油体系研发

在高黏弹聚合物与降黏型驱油剂相互作用研究的基础上开展降黏复合驱油体系设计^[43-44],降黏复合驱油体系由质量分数为0.24%的高黏弹聚合物和质量分数为0.3%的降黏型驱油剂构成。孤东九区地层温度为70 ℃,注入水总矿化度为10 607 mg/L,钙镁离子质量浓度为357 mg/L,地层原油黏度为772 mPa·s,在该油藏条件下,降黏复合驱油体系的黏度为62 mPa·s,油水界面张力为5.0×10⁻² mN/m,降黏率为93%。

利用物理模拟实验评价不同驱油体系的驱油效果。在化学剂注入段塞均为0.3 PV时,单一降黏驱油方法提高采收率幅度有限,比水驱提高采收率3.3%;单一聚合物驱比水驱提高采收率12.3%;降黏复合驱比水驱提高采收率17.3%,降黏复合驱提高采收率幅度优于单一聚合物驱和单一表面活性剂驱的总和。

2.3.3 先导试验

在孤东九区西Ng4-6单元开展降黏复合驱先导

试验,试验区石油地质储量为 $374 \times 10^4 \text{t}$,孔隙度为34.2%,渗透率为1 531.5 mD,地面原油黏度为2 000~6 000 mPa·s。2021年2月开始注入前置段塞,2021年9月注入降黏复合驱油体系主体段塞。降黏复合驱先导试验实施后,综合含水率由91.9%最低降至85.1%,最大降幅为6.8%;试验区明显见效井为53口,见效率为94.6%,累积增油量为 $7.1 \times 10^4 \text{t}$,提高采收率1.9%,预测可提高采收率9.8%,取得了显著的降水增油效果。

3 技术效果与展望

胜利油田针对高温高盐油藏条件,不断深化基础研究,推动技术发展^[45]。深化了驱油剂加合增效理论认识,形成了海上二元复合驱、非均相复合驱、高黏油藏化学驱等技术并实现规模化推广应用。“十三五”以来,高温高盐油藏化学驱技术共动用石油地质储量为 $1.68 \times 10^8 \text{t}$,增加可采储量为 $1 941 \times 10^4 \text{t}$,为胜利油田持续稳产、高质量发展提供了强力支撑^[46]。

在今后的化学驱技术研发与应用中,将聚焦特高温特高盐、二元复合驱后、中低渗透等3类油藏开展技术攻关。针对特高温(地层温度大于 $95 \text{ }^\circ\text{C}$)特高盐(矿化度大于 $30 000 \text{ mg/L}$ 、钙镁离子质量浓度大于 $1 000 \text{ mg/L}$)油藏条件下常规聚合物稳定性急剧下降的问题,开展高温高盐对聚合物稳定性影响机制研究,研发耐温抗盐聚合物,攻关耐特高温抗水解聚合物驱技术。面对中低渗透油藏渗透率低、注入困难等挑战,深化驱油剂与原油构效关系研究,研发纳米渗吸排驱体系,攻关中低渗透油藏纳米化学驱技术。围绕二元复合驱后油藏非均质性更强、剩余油分布更分散等难题,研发调驱及洗油性能更强的化学驱油体系,攻关二元复合驱后油藏化学驱技术。

4 结束语

(1)化学驱理论方面,阐明了“变形通过、液流转向、均衡驱替、调洗协同”的非均相复合驱提高采收率机理,取得了高黏油藏化学驱“黏弹性并重”与“大幅度降低黏附功”的重要认识。

(2)围绕海上油藏条件,研发了高效二元复合驱油体系,室内提高采收率达到31.2%,设计了全密闭配注工艺,形成了海上油田二元复合驱技术。利

用该技术在埕岛油田开展先导试验,日产油量最大增幅为537 t/d,含水率最大降幅为11%,实现了海上油田化学驱技术的突破。

(3)针对聚合物驱后油藏条件,研发了具有部分交联部分支化结构的黏弹性颗粒驱油剂,设计了非均相复合驱油体系,创建了非均相复合驱技术。该技术应用于孤岛油田中一区Ng3单元聚合物驱后油藏,日产油量增加了24倍,综合含水率最大降幅为16.9%,最终采收率为63.6%,降水增油效果显著。

(4)面对高黏油藏原油黏度高、指进严重等挑战,研发了兼具降黏和降油水界面张力的新型驱油剂,设计了水相增黏油相降黏复合驱油体系,其界面张力为 $5.0 \times 10^{-2} \text{ mN/m}$,降黏率为93%,形成了高黏油藏降黏复合驱技术。该技术在孤东九区西Ng4-6单元开展先导试验,综合含水率下降了6.8%,油井见效率为94.6%,累积增油量为 $7.1 \times 10^4 \text{t}$,支撑了高黏油藏的高效开发。

参考文献

- [1] 孙焕泉,张宗耀,杨勇,等.胜利油田特高含水期提高采收率技术[M].北京:石油工业出版社,2023.
SUN Huanquan, ZHANG Zonglin, YANG Yong, et al. Enhanced oil recovery technology during the ultra-high water cut period in Shengli Oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2023.
- [2] 孙焕泉,杨勇,王海涛,等.特高含水油藏剩余油分布特征与提高采收率新技术[J].中国石油大学学报:自然科学版,2023,47(5):90-102.
SUN Huanquan, YANG Yong, WANG Haitao, et al. Distribution characteristics of remaining oil in extra-high water cut reservoirs and new technologies for enhancing oil recovery [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2023, 47(5): 90-102.
- [3] 杨勇,曹绪龙.高含水老油田化学驱综合治理新方法 & 工程实践路径[J].油气地质与采收率,2024,31(1): 63-71.
YANG Yong, CAO Xulong. New comprehensive management method and engineering practice path for mature oilfields with high water cut [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(1): 63-71.
- [4] 孙焕泉,徐龙,王卫东,等.基于核磁共振技术的黏弹性颗粒驱油剂流动特征[J].科学技术与工程,2021,21(2):546-550.
SUN Huanquan, XU Long, WANG Weidong, et al. Flow characteristics of viscoelastic particle flooding agent based on nuclear magnetic resonance technology [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(2): 546-550.
- [5] 刘煜.黏弹性颗粒驱油剂在多孔介质中的渗流规律[J].科学技术与工程,2017,17(24):218-222.

- LIU Yu. Flow mechanisms of viscoelastic particles displacing agent in porous media [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(24): 218-222.
- [6] 于龙, 宫厚健, 李亚军, 等. 非均质油层黏弹性凝胶颗粒提高采收率机理研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(17): 59-63.
YU Long, GONG Houjian, LI Yajun, et al. The mechanism of using PPG to enhance oil recovery in heterogeneous reservoir [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(17): 59-63.
- [7] 于龙, 李亚军, 宫厚健, 等. 支化预交联凝胶颗粒驱油机理可视化实验研究[J]. *断块油气田*, 2014, 21(5): 656-659.
YU Long, LI Yajun, GONG Houjian, et al. Visualization experimental study on oil-displacement mechanism of B-PPG system [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2014, 21(5): 656-659.
- [8] 乐平, 屈思敏, 李丰辉, 等. 高孔高渗高含水稠油油藏剩余油分布特征及动用的主控因素[J]. *非常规油气*, 2023, 10(2): 33-42.
YUE Ping, QU Simin, LI Fenghui, et al. Remaining oil distribution characteristics and main controlling factors for use in high porosity, high permeability and high water cut heavy oil reservoirs [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2023, 10(2): 33-42.
- [9] 孟庆春, 何刚, 郭发军, 等. 支化预交联凝胶颗粒提高采收率机理实验[J]. *特种油气藏*, 2023, 30(5): 105-112.
MENG Qingchun, HE Gang, GUO Fajun, et al. Experiment on the mechanism of enhanced recovery by branched pre-crosslinked gel particles [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(5): 105-112.
- [10] 马广彦. 聚丙烯酰胺驱替中的粘弹效应和油藏压力分布[J]. *油田化学*, 1996, 13(4): 66-69, 81.
MA Guangyan. High temperature mud acid corrosion inhibitors as used in medium and low temperature acidizing fluids [J]. *Oilfield Chemistry*, 1996, 13(4): 66-69, 81.
- [11] 宋新旺. 多孔介质中聚丙烯酰胺溶液流变性研究[J]. *油气地质与采收率*, 2002, 9(3): 13-15.
SONG Xinwang. Study on the rheological property of polyacrylamide solution in porous media [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2002, 9(3): 13-15.
- [12] 冯茹森, 周洋, 郭拥军, 等. 聚合物驱油体系弹性对高黏稠油驱油效率的影响[J]. *油田化学*, 2016, 33(2): 271-275, 280.
FENG Rusen, ZHOU Yang, GUO Yongjun, et al. Influence of the elasticity of polymer flooding on the displacement efficiency of heavy oil [J]. *Oilfield Chemistry*, 2016, 33(2): 271-275, 280.
- [13] 李农, 赵立强, 惠栋, 等. 高含硫储层硫沉积微观特性[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(1): 168-174, 184.
LI Nong, ZHAO Liqiang, HUI Dong, et al. Microscopic characteristics of sulfur depositions in high-sulfur-content reservoirs [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(1): 168-174, 184.
- [14] 姚同玉, 李继山, 周广厚. 影响驱油剂洗油效率的参数分析[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(3): 99-102.
YAO Tongyu, LI Jishan, ZHOU Guanghou. Analysis of parameters influencing oil displacement efficiency of oil displacement agent [J]. *Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition*, 2008, 32(3): 99-102.
- [15] 孙记夫, 戴莹, 陈权生, 等. 岩石表面可润湿性反转对二元复合驱提高采收率的影响[J]. *日用化学工业*, 2015, 45(9): 500-504, 508.
SUN Jifu, DAI Ying, CHEN Quansheng, et al. Effect of wettability reversal of rock surface on oil recovery by binary compound flooding [J]. *China Surfactant Detergent & Cosmetics*, 2015, 45(9): 500-504, 508.
- [16] 鲁锋, 李照阳, 杨召, 等. 激光扫描共聚焦显微分析技术表征页岩亚微米级孔隙中的含油性——以准噶尔盆地芦草沟组页岩为例[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(1): 193-202.
LU Feng, LI Zhaoyang, YANG Zhao, et al. Characterization of oil-bearing properties in sub-micron shale pores by laser scanning confocal microscopy technology: a case study of shale in Lucaogou Formation, Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(1): 193-202.
- [17] 曹绪龙, 祝仰文, 元福卿, 等. 化学驱高黏油藏大幅度提高采收率技术[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
CAO Xulong, ZHU Yangwen, YUAN Fuqing, et al. Greatly enhanced oil recovery technology for high-viscosity reservoirs by chemical flooding [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [18] 山金城, 李保振, 张延旭, 等. 海上油田化学驱技术研究与应用进展[J]. *科技导报*, 2020, 38(17): 127-133.
SHAN Jincheng, LI Baozhen, ZHANG Yanxu, et al. Review of the development and field application of worldwide offshore chemical eor technology [J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(17): 127-133.
- [19] 孙福街. 中国海上油田高效开发与提高采收率技术现状及展望[J]. *中国海上油气*, 2023, 35(5): 91-99.
SUN Fujie. Status and prospects of efficient development and EOR technologies in China offshore oilfields [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(5): 91-99.
- [20] 张国浩, 邓景夫, 张振杰, 等. 海上油田化学驱注入浓度优化调整新技术及矿场实践[J]. *承德石油高等专科学校学报*, 2023, 25(3): 10-14.
ZHANG Guohao, DENG Jingfu, ZHANG Zhenjie, et al. New technology and field practice of injection concentration optimization and adjustment of chemical flooding in offshore oilfield [J]. *Journal of Chengde Petroleum College*, 2023, 25(3): 10-14.
- [21] 张健, 陈家庆, 王秀军, 等. 海上油田聚合物驱采出液高效处理一体化模式与关键技术[J]. *石油学报: 石油加工*, 2023, 39(4): 809-819.
ZHANG Jian, CHEN Jiaqing, WANG Xiujun, et al. Integrated mode and critical technologies for efficient treatment of polymer-flooding produced fluid in offshore oilfield [J]. *Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section*, 2023, 39(4): 809-819.
- [22] 孙秀芝, 何冬月, 庞雪君, 等. 海上驱油用聚合物关键指标研究[J]. *石油工程建设*, 2021, 47(S2): 168-172.

- SUN Xiuzhi, HE Dongyue, PANG Xuejun, et al. Key indexes of polymer for offshore oil displacement [J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2021, 47 (S2): 168-172.
- [23] 何金钢,杨晶,唐生,等.还原性铁和硫离子对聚合物性能的影响[J].*油田化学*,2015,32(3):370-375.
- HE Jingang, YANG Jing, TANG Sheng, et al. Effect of Fe^{2+} and S^{2-} on performance of polymer solution [J]. *Oilfield Chemistry*, 2015, 32(3): 370-375.
- [24] 范白涛,王名春,顾纯巍,等.中国近海浅水水下井口钻完井模式现状与展望[J].*中国海上油气*,2023,35(3):154-160.
- FAN Baitao, WANG Mingchun, GU Chunwei, et al. Current situation and prospect of drilling and completion modes with subsea wellhead in shallow waters of offshore China [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(3): 154-160.
- [25] 展转盈,倪军.纳米颗粒对活油中沥青质分散潜力探讨[J].*地质科技通报*,2023,42(6):86-94.
- ZHAN Zhuanying, NI Jun. Dispersion potential of asphaltene in live oil by nanoparticles [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(6): 86-94.
- [26] 王德民,张怀钰,王研,等.同井注采工艺技术及其矿场应用[J].*大庆石油地质与开发*,2023,42(4):45-54.
- WANG Demin, ZHANG Huaiyu, WANG Yan, et al. Single-well injection and production technology and its field application [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2023, 42(4): 45-54.
- [27] 王欣然,杨丽娜,王艳霞,等.海上双重介质油藏三次采油提高采收率实验研究[J].*断块油气田*,2022,29(5):704-708.
- WANG Xinran, YANG Lina, WANG Yanxia, et al. Experimental study on tertiary oil recovery EOR of offshore dual media reservoir [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2022, 29(5): 704-708.
- [28] 张莉,崔晓红,任韶然.聚合物驱后油藏提高采收率技术研究[J].*石油与天然气化工*,2010,39(2):144-147.
- ZHANG Li, CUI Xiaohong, REN Shaoran. The study on enhanced oil recovery technology in reservoirs after polymer flooding [J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2010, 39(2): 144-147.
- [29] 韩继盟.改善聚合物驱后续水驱开采效果分析——以孤岛油田中一区Ng3为例[J].*油气地质与采收率*,2006,17(4):91-92.
- HAN Jimeng. Analysis of improving waterflooding effects after polymer flooding—taking Ng3 of central regional of Gudao Oilfield as an example [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2006, 17(4): 91-92.
- [30] 姜颜波.孤岛油田中一区聚合物驱后油层的波及状况[J].*油气地质与采收率*,2005,12(1):66-67,70.
- JIANG Yanbo. Sweep conditions of oil reservoirs after polymer flooding [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2005, 12(1): 66-67, 70.
- [31] 崔晓红.新型非均相复合驱油方法[J].*石油学报*,2011,32(1):122-126.
- CUI Xiaohong. A study on the heterogeneous combination flooding system [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(1): 122-126.
- [32] 孙焕泉,曹绪龙,黄光速,等.一种部分支化部分交联聚合物驱油剂及其制备方法:ZL201510482896.6[P].2019-05-10.
- SUN Huanquan, CAO Xulong, HUANG Guangsu, et al. A kind of partially branched and partially crosslinked polymer oil displacement agent and its preparation method: ZL201510482896.6 [P]. 2019-05-10.
- [33] 曹绪龙,刘煜,曹伟东.非均相复合驱中黏弹性颗粒驱油剂与储层孔喉匹配关系[J].*石油学报*,2022,43(2):262-269.
- CAO Xulong, LIU Yu, CAO Weidong. Matching relation between preformed particle gel and reservoir pore throat during heterogeneous phase combination flooding [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(2): 262-269.
- [34] 曹绪龙.非均相复合驱油体系设计与性能研究[J].*石油学报:石油加工*,2013,29(1):115-121.
- CAO Xulong. Design and performance evaluation on the heterogeneous combination flooding system [J]. *Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section*, 2013, 29(1): 115-121.
- [35] 孙焕泉,曹绪龙,李宗阳,等.基于储层孔喉匹配的非均相复合驱技术研究与应用——以胜坨油田一区沙二段1-3砂组聚合物驱后单元为例[J].*油气地质与采收率*,2020,27(5):53-61.
- SUN Huanquan, CAO Xulong, LI Zongyang, et al. Research on heterogeneous combination flooding technology based on matching between system and reservoir pore throat and its field application: a case of post-polymer flooding Es_2^{1-3} in Sheng 1 area, Shengtuo Oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(5): 53-61.
- [36] 赵方剑,侯健,元福卿,等.高温高盐断块油藏非均相复合驱技术研究与应用[C].*青岛:油气田勘探与开发国际会议*,2021.
- ZHAO Fangjian, HOU Jian, YUAN Fuqing, et al. Research and application of heterogeneous composite flooding technology in high-temperature and high-salinity fault block reservoirs [C]. Qingdao: International Field Exploration and Development Conference, 2021.
- [37] 郑昕,姚秀田,夏海容,等.稠油化学堵调降黏复合驱油体系构建及驱油机理分析[J].*油气地质与采收率*,2021,28(6):122-128.
- ZHENG Xin, YAO Xiutian, XIA Hairong, et al. Establishment of combined viscosity reduction flooding system for chemical water shutoff and profile control in heavy oil reservoirs and analysis of its mechanism [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(6): 122-128.
- [38] 朱诗杰,叶仲斌,施雷庭,等.驱油用聚合物溶液的流变模型应用优化研究[J].*油气藏评价与开发*,2022,12(4):677-683.
- ZHU Shijie, YE Zhongbin, SHI Leiting, et al. Application and optimization of rheological model of polymer solution for oil displacement [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(4): 677-683.
- [39] 元福卿,徐辉,宋敏,等.弹性作用对驱油用聚合物扩大波及能力的影响[J].*断块油气田*,2022,30(1):149-153,160.

- YUAN Fuqing, XU Hui, SONG Min, et al. The influence of elasticity on the sweep efficiency of polymer for oil displacement [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2022, 30(1): 149-153, 160.
- [40] 李硕轩,赵东睿,高红茜,等.超高分子聚合物驱提高高盐稠油油藏采收率机理及现场应用[J].*钻采工艺*,2023,46(1): 132-139.
- LI Shuoxuan, ZHAO Dongrui, GAO Hongqian, et al. Investigation on mechanism and effect of ultra-high molecular polymer flooding for enhancing recovery in high salinity heavy oil reservoirs [J]. *Drilling & Production Technology*, 2023, 46(1): 132-139.
- [41] SONG Shenghan, ZHANG Heng, SUN Lixin, et al. Molecular dynamics study on aggregating behavior of asphaltene and resin in emulsified heavy oil droplets with sodium dodecyl sulfate [J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(12): 12 383-12 393.
- [42] 曹绪龙,于群,石静,等.普通稠油降黏化学驱技术研究与应用[M].北京:科学出版社,2021:28-29.
- CAO Xulong, YU Qun, SHI Jing, et al. Research and application of viscosity reducing chemical flooding technology for ordinary heavy oil reservoirs [M]. Beijing: Science Press, 2021: 28-29.
- [43] 王业飞,仲东,徐睿,等.二元复合体系乳化性能及其对普通稠油的驱替效果[J].*油气地质与采收率*,2019,26(5):79-85.
- WANG Yefei, ZHONG Dong, XU Rui, et al. Emulsification properties of binary composite system and their effect on displacement of conventional heavy oil [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(5): 79-85.
- [44] WANG Yefei, LI Zongyang, DING Mingchen, et al. Performance of a good-emulsification-oriented surfactant-polymer system in emulsifying and recovering heavy oil [J]. *Energy Science & Engineering*, 2020, 8(2): 353-365.
- [45] 杨勇,张世明,曹小朋,等.胜利油田低渗透油藏压驱开发技术实践与认识[J].*油气地质与采收率*,2023,30(6):61-71.
- YANG Yong, ZHANG Shiming, CAO Xiaopeng, et al. Practice and understanding of pressure drive development technology for low-permeability reservoirs in Shengli Oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2023, 30(6): 61-71.
- [46] 牛栓文.胜利油田低渗致密油藏地质工程一体化探索与实践[J].*中国石油勘探*,2023,28(1):14-25.
- NIU Shuanwen. Research and application of geology and engineering integration for low permeability tight oil reservoirs in Shengli Oilfield [J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(1): 14-25.

编辑 经雅丽