



关于化学驱极限提高采收率路径的思考

吕伟峰^{1,2}, 李源^{1,2}, 张群^{1,2*}, 丁彬^{1,2}, 周朝辉^{1,2}, 修建龙^{1,2}, 邹新源^{1,2}

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 提高油气采收率全国重点实验室, 北京 100083

*通讯作者, E-mail: zhangqun1980@petrochina.com.cn

收稿日期: 2025-06-10; 接受日期: 2025-07-31; 网络版发表日期: 2025-11-06

国家自然科学基金(编号: 52474075)和国家重点研发计划(编号: 2018YFA0902100)资助项目

摘要 化学驱作为我国中高渗透油藏提高采收率的主体技术之一, 在保障原油稳产和油田可持续发展中发挥着不可替代的作用. 本文系统梳理了化学驱技术发展脉络, 剖析了当前面临的技术瓶颈, 并提出可实现极限采收率的技术路径与未来发展方向. 经过数十年技术攻关, 聚合物驱、三元复合驱、二元复合驱等主体技术已形成工业化应用体系并取得显著进展. 然而, 随着油田开发的不断深入, 储层非均质性加剧、微观剩余油赋存复杂化、传统驱油剂适应性不足等问题日益凸显, 迫切需要革新基础理论, 探索创新提高采收率技术. 我们认为在未来研究中通过智能可控封堵、化学混相、靶向驱替, 结合人工智能等手段是化学驱技术实现极限采收率目标的重要途径.

关键词 化学驱, 极限采收率, 油田开发, 人工智能

1 引言

能源安全是国家经济发展和社会稳定的重要保障, 2014年我国成为全球第一大石油进口国, 2018年原油对外依存度突破70%^[1], 且至今未见明显回落, 这凸显了我国油气安全领域存在的严峻短板. 当前实现国内原油稳产主要通过两大技术路径: 一是持续提升已开发油田的原油采收率, 二是推进非常规原油资源的规模化高效开发. 值得注意的是, 非常规油气新井普遍面临初期产量递减率高、稳产周期短等开发挑战. 在此背景下, 依托技术创新深度挖掘现有油田潜力, 持续提高现有油田采收率, 已成为保障我国原油产量长期稳定的核心举措.

在依靠天然能量衰竭进行的一次采油以及通过注气或注水维持油层压力进行的二次采油之后, 油藏中通常仍存在至少40%的剩余油^[2], 因此研究人员提出通过注入化学物质^[3]、气体^[4]、微生物^[5]、热能^[6]等方法进一步提高采收率, 即三次采油. 部分学者提出的四次采油概念也是在现有的提高采收率技术(EOR)的基础上进一步采用了更先进的技术手段来开采剩余油^[7], 以动用更多难采储量. 但部分三次采油技术应用仍面临许多问题. 例如, 气体本身黏度低、密度小的特点导致气驱过早发生气窜, 利用效率低; 热力采油需注入高温蒸汽形成热源, 能量消耗大、成本高等. 相比之下, 化学驱技术通过注入聚合物、表面活性剂等化学药剂, 不仅可以有效提高驱油效率, 还可以通过微

引用格式: Lv W, Li Y, Zhang Q, Ding B, Zhou Z, Xiu J, Zou X. Paths to ultimate enhanced oil recovery by chemical flooding. *Sci Sin Chim*, 2025, 55: 3417–3434, doi: 10.1360/SSC-2025-0170

生物作用进一步改善驱油效果,在堵/调/驱和应用成本等方面具有显著优势,有望成为实现极限提高采收率的主要途径。

本文系统梳理化学驱技术发展脉络,从储层非均质调控、微观剩余油启动机制、驱油剂功能设计等维度剖析技术瓶颈,提出基于智能靶向、分子工程与数据驱动的解决方案,并展望多学科交叉融合趋势下的技术发展方向,以期为我国油田高效开发提供理论支撑。

2 化学驱发展历程

中国化学驱技术经过持续的攻关与技术的迭代(图1),形成了以聚合物驱、三元复合物驱、二元复合物驱为代表的系列主体技术^[8]。该技术群自工业化应用以来已连续24年保持千万吨级年产量规模,成为当前我国中高渗老油田大幅度提高采收率的主要手段,技术和应用规模整体处于国际领先水平。

2.1 聚合物驱

自聚合物黏弹性驱油理论提出以来,聚合物驱技术已成为我国中高渗老油田开发中后期提高采收率的主要手段。研究证实,向注入水中加入高分子量聚合物可显著增大水相黏度,改善水油流度比并扩大波及体积,进而有效提升驱油效率。以大庆油田为代表的陆相湖盆沉积油藏,因埋藏较浅、温度和矿化度相对较低,率先在实验与理论上取得突破,构建了聚合物驱油技术体系。该体系建立了聚合物黏弹性驱油理论,突破了传统认识中聚合物溶液因本身不具备降低界面

张力的能力而难以大幅提高微观驱油效率的理论局限。同时建立了聚合物注入参数与储层物性多因素匹配理论,并研发了不同分子量、官能团的聚合物产品。在此基础上,建成了年产能超40万吨的世界规模生产基地^[9]。另外,中低渗透储层吨聚增油由初期的37 t提高到54 t^[10],累计动用储量增加,提高采收率14%以上。胜利油田针对高温高盐油藏开展了系统研究,提出了较高黏度与良好弹性并重的增黏技术路径,确立了合理的黏度比与流度比范围,成功将聚合物驱应用于I、II类高温高盐油藏^[11]。胜坨油田沙二段1-3砂层组(II类油藏,温度70~80℃,矿化度10000~20000 mg/L),选用超高分子量的部分水解聚丙烯酰胺(HPAM),注聚后综合含水率下降至81.7%,日产油量从261 t提高至608 t,采收率增幅达6.8% (图2a)^[12]。为支撑东部老油田稳产,河南油田致力于采用化学驱技术动用III类高温油藏储量,以实现I、II类储量的化学驱产量的整体接替^[13]。为此,研究人员在油藏温度为93.7℃的III类油藏双河VII1-3层系选取了5个井组,开展了高温油藏交联聚合物驱先导试验。试验证实该体系具备优良注入性与长期地下稳定性,动态响应呈现出见效时间迟、见效高峰期长、含水回升速率缓的特征。截至2016年,累计增油 6.19×10^4 t,阶段提高采收率6.11%,预测最终提高采收率将超过8%^[11,14],其技术经济指标均优于II类储层聚合物驱(图2b)。

综合而言,我国聚合物驱技术已逐步形成针对不同油藏类型的多层次配套体系。该技术通过研发大分子量和多官能团聚合物、发展高效增黏和弹性调控手段以及完善地面配注与跟踪调整工艺,为我国多种油藏条件下大幅度提高采收率提供了重要的技术支撑。

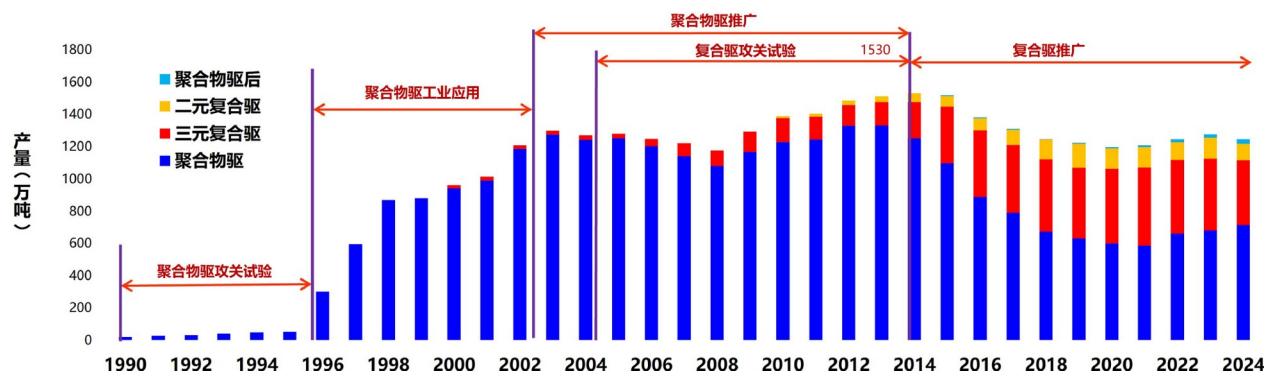


图1 (网络版彩图)我国化学驱发展历程

Figure 1 (Color online) Development history of chemical flooding.

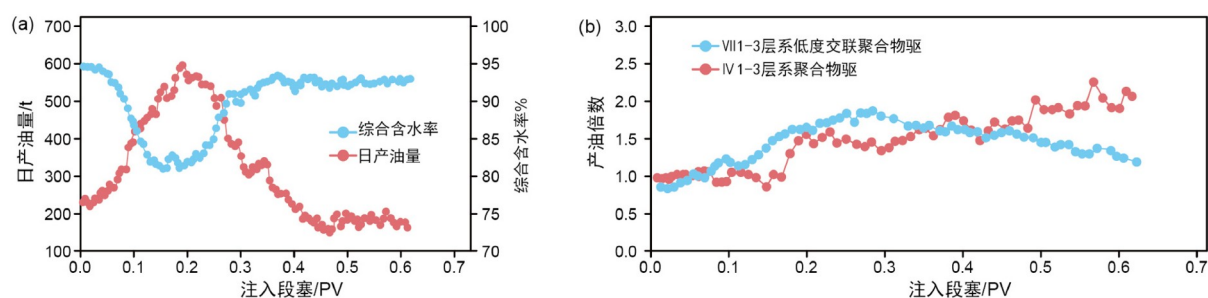


图 2 (网络版彩图)聚合物驱矿场试验效果. (a) 胜利油田一区沙二段1-3砂层先导试验区生产曲线^[12]. (b) 河南油田IV1-3层系、VII1-3层系化学驱日产油上升幅度比较^[13]

Figure 2 (Color online) Polymer flooding field test performance. (a) Production profile of pilot test area in sand group 1-3, Es2 formation, Shengli oilfield [12]. (b) Comparison of daily oil production increase amplitudes in chemical flooding for layer IV1-3 vs. VII1-3, Henan oilfield [13].

2.2 三元复合驱

三元复合驱技术(alkali-surfactant-polymer, ASP驱)是在聚合物驱基础上发展起来的一种重要的提高采收率技术. 该技术通过聚合物、碱和表面活性剂三种化学剂的协同作用来提高驱油效率. 三元复合驱的主要作用机制包括降低油水界面张力至超低水平(10^{-3} mN/m量级)、改善油水流动度比、扩大波及系数, 以有效提高微观驱油效率, 从而更彻底地动用剩余油(图3a). 我国在20世纪80年代初研发的重烷基苯磺酸盐和石油磺酸盐等一系列表面活性剂产品, 成功克服了国外表面活性剂产品价格高昂、供应不可控的难题, 成本降低超过35%, 这为ASP驱的规模化应用提供了技术基础. 大庆油田针对低酸值原油, 通过烷基苯磺酸盐等表面活性剂与强、弱碱的复配, 开发出系列高效低成本驱油体系, 并在矿场实施了分阶段调控与注采工艺^[15]. 三元复合驱在2014年实现规模化工业应用, 至2017年产量已达到400万吨, 较常规水驱平均提高采收率20%以上(图3b). 自20世纪90年代起, 针对高温高盐油藏特性, 胜利油田开展了高温高盐三元复合驱的矿场试验与研究. 孤东小井距试验区应用该技术后, 含水率明显降低, 累计提高采收率达13.4%^[16]; 随后的孤岛西区弱碱三元复合驱扩大试验也取得显著增油降水效果, 提高采收率幅度超过12%(图3c). 河南油田在双河油区开展的弱碱三元复合驱工业化应用, 在高温($> 90^{\circ}\text{C}$)和综合含水97%的条件下采收率提高超过12%. 新疆克拉玛依油田针对砾岩油藏非均质性强、矿化度高、二价阳离子含量大的特点, 研发了适应油藏特点的石油磺酸盐弱碱三元复合驱体系, 通过小井

距矿场试验提高采收率达24.5%.

弱碱复合驱能显著减少结垢、腐蚀引发的维护问题及降低采出液乳化的处理难度, 相比强碱复合驱更具优势, 是当前及未来更适合大规模推广的三元复合驱主导技术. 不过, 研究人员仍需改进表面活性剂及其生产工艺, 包括拓宽其应用范围并提升产品稳定性, 加强主段塞注入前的耐碱调剖研究, 降低主段塞用量, 优化体系配方、段塞组合和分阶段调控措施, 从而全面提升矿场试验效果.

2.3 二元复合驱

由于碱的加入带来了结垢、腐蚀、破乳等工程难题, 近年来, 以甜菜碱、阴非离子表面活性剂为代表的新型高效表面活性剂取得了突破性进展(表1). 表面活性剂-聚合物二元复合驱体系在无碱条件下仍能使油水界面张力达到超低量级并促使油水体系产生适度乳化, 从而推动了二元复合驱技术的快速发展. 2003年胜利油田在孤东七区率先开展无碱二元复合驱先导试验, 提高采收率12%~16%; 辽河、新疆、大港、大庆、长庆等油田陆续进行矿场试验, 采收率平均提高幅度可达16%~21%, 试验区含水率显著下降、产油量实现倍增. 然而, 由于缺乏碱对油水界面的稳定作用, 二元复合驱整体提高采收率幅度仍略低于三元复合驱. 同时, 相关核心药剂如阴非离子表面活性剂、甜菜碱等的研制和规模化生产仍需深入优化研究. 此外, 二元驱对油藏渗透率一般要求不低于10 mD、温度不超过 75°C 且矿化度不高于10 g/L. 超出该范围时, 聚合物易发生剪切降解和有效含量损失问题, 影响驱油效果.

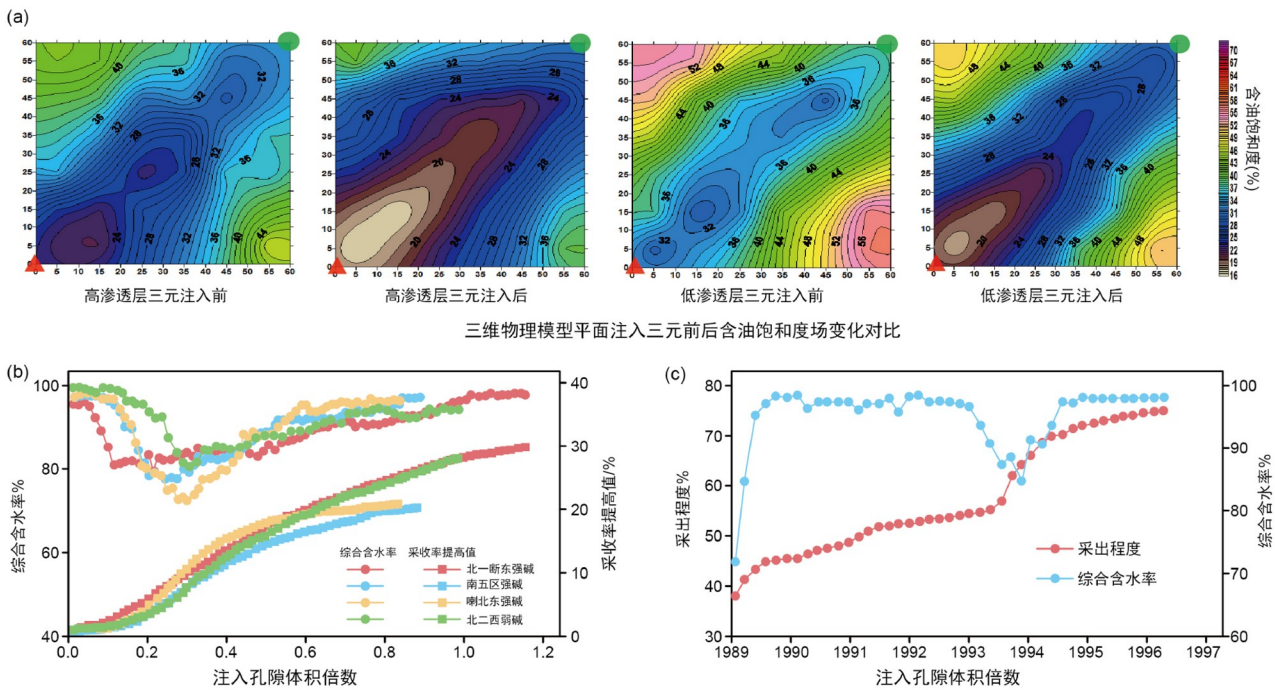


图 3 (网络版彩图)三元复合驱矿场试验效果. (a) 三维物理模型平面注入三元前后含油饱和度场变化对比. (b) 大庆油田三元复合驱工业性矿场试验效果^[15]. (c) 孤东油田小井距三元复合驱生产过程中采出程度和综合含水率变化比^[16]

Figure 3 (Color online) ASP flooding field test performance. (a) Oil saturation distribution contrast before and after ASP injection in a three-dimensional (3D) physical model. (b) Field-scale pilot test results of ASP flooding in Daqing oilfield ^[15]. (c) Variation profiles of recovery factor and composite water cut during ASP flooding in a closely-spaced well pattern, Gudong oilfield ^[16].

表 1 国内SP二元复合驱现场试验区块油藏性质及复合驱提高采收率效果预测^[17]

Table 1 Characteristics of reservoir properties and enhanced oil recovery prediction for a domestic pilot test of SP binary combination flooding ^[17]

油田区块	原油黏度 (mPa s)	油层温度 (°C)	渗透率 (mD)	矿化度 (g/L)	二价离子含量 (mmol/L)	原油酸值 (mg _{KOH} /g)	表面活性剂类型	预测提高 采收率(%)
吉林红岗	12.9	55	163	14000	43	0.14	石油磺酸盐	13.8
新疆七中区	26.0	40	119	6500	90–170	0.18	石油磺酸盐(KPS + 助剂)	15.5
辽河锦16块	14.0	55	2859	3500	42.2	0.4–1.16	两性表面活性剂	15.4
长庆马岭	2.3	51	67	26130	510	—	两性表面活性剂	15.1
胜利油田孤东七区	45.0	68	1320	8200	230	2.98	石油磺酸盐(WPS + 助剂)	12.7

2.4 微生物驱

微生物驱采油技术自20世纪40年代提出以来, 历经数十年的探索, 已逐步形成了较为系统的理论基础和多样化的技术路线. 根据微生物来源不同, 微生物驱主要分为内源微生物驱和外源微生物驱两种模式.

内源微生物驱是通过注入营养物质, 激活和强化油藏自身固有微生物菌群的代谢活性, 从而达到提高采收率的目的. 1977年, Ivanov等^[18]系统分析了Bon-

dyuzhskoe油田中微生物群落的组成及其代谢路径, 提出了微生物驱的“两步激活”理论, 即先激活注入水中的好氧菌, 再通过其产生的代谢产物进一步刺激厌氧菌活性产生气体和有机酸等物质, 这可以有效提高原油流动性. 外源微生物驱则是通过向油藏内注入特定的微生物菌群及营养物质, 利用微生物在储层中生长繁殖过程中产生的代谢产物, 降低原油黏度、改善储层润湿性, 增加油藏波及体积, 从而提高原油采收率(图4). Belyaev等^[19]提出的将微生物注入地下以提高

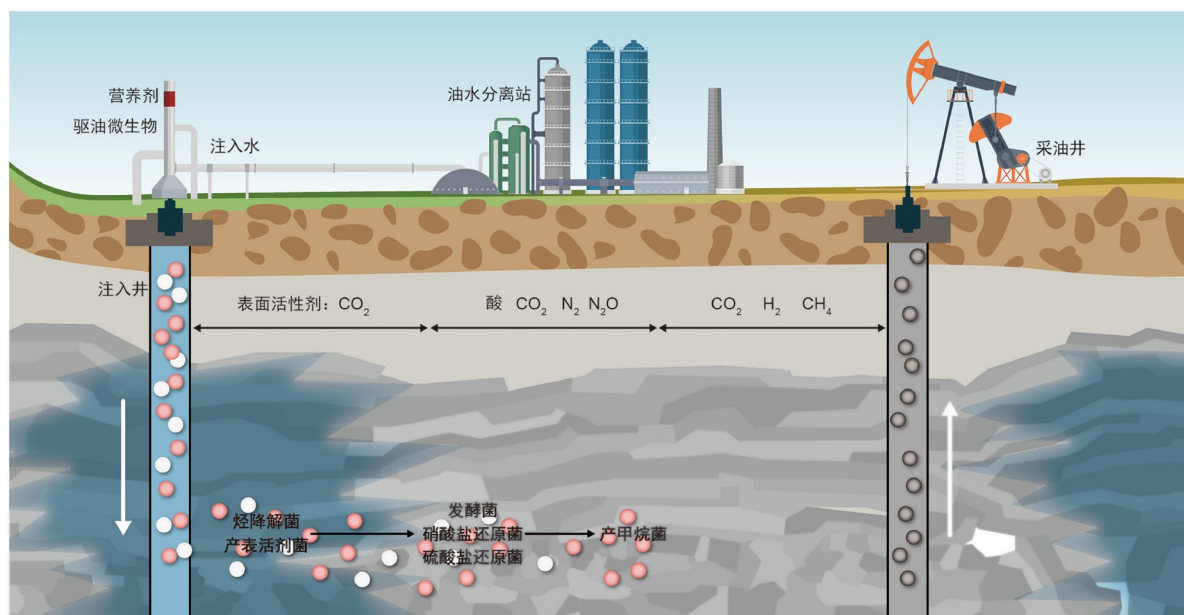


图 4 (网络版彩图)水驱油藏内外源微生物采油过程示意图

Figure 4 (Color online) Schematic diagram of microbial enhanced oil recovery process using indigenous and exogenous microbes in water-flooded reservoirs.

采收率的方法, 也为该领域的后续研究奠定了基础。

我国微生物驱技术的研究始于20世纪60年代初期, 中国科学院微生物研究所率先在玉门油田开展了油藏微生物驱的研究^[20]。1997年, 大港油田在国内开展了微生物驱矿场试验, 并于2000~2003年与俄罗斯科学院合作, 在孔店油田实施了内源微生物驱试验。胜利油田罗801区块自1999年开展微生物驱以来, 通过持续的技术优化, 从空气辅助微生物驱逐步转向内源微生物驱, 截至2019年累计增油超过16万吨, 提高采收率达16.4%, 成为我国目前运行时间最长的微生物驱示范区块。胜利油田沾3区块及辛68高温高盐区块开展的微生物驱试验分别提高采收率3.13%和2.52%, 表明微生物驱在复杂油藏条件下的适用潜力巨大。在两期国家高技术研究发展计划(“863”计划)支持下, 新疆油田砾岩油藏三个区块自2013年先后开展了内源微生物驱系列先导试验, 目前累积增油超8万吨, 综合成本低于20美元/桶。华北油田则结合凝胶调驱技术, 通过凝胶与微生物协同作用, 显著提高了微生物工作液的波及体积, 增油效果显著, 截至目前累计增油量超过26万吨。尽管微生物驱油在现场试验中能提高采收率并增油, 但由于增产幅度普遍偏低、含水率下降缓慢, 其工业应用受到了限制。

2.5 纳米流体驱

近年来, 针对低渗透油藏储层物性差、非均质性强、常规水驱开发效果受限等问题, 纳米流体技术凭借其在改变界面张力、润湿性等方面的独特机制, 已成为提高采收率的新方向^[21,22]。纳米驱油剂是一种应用于油田开发的高新技术产品, 其核心特征在于采用纳米级粒径材料。通过独特的物理化学特性(如超大比表面积、可控润湿性及界面调控能力), 该技术能够有效改善原油在储层中的渗流行为与流动特性。其作用机制主要体现在两方面: 一是通过降低油水界面张力增强原油流动性, 二是改变岩石表面润湿性以提升微观驱替效率, 最终实现油气采收率的显著提高^[23]。

纳米驱油剂作为提高原油采收率的功能材料, 其制备工艺的多样性直接影响最终产品的性能指标和现场应用效果。当前主流的制备技术主要分为化学合成法和物理法两大技术路线, 不同方法在粒径控制、表面修饰和分散稳定性等方面各具特色。在实际应用中, 需要根据目标油藏的渗透率特征、流体性质等关键参数, 系统评估不同制备方法的适用性, 以确保纳米驱油剂在低渗储层中能够实现最优的渗吸-驱替协同效果^[24]。

欧美发达国家在纳米驱油剂领域的研究处于全球

领先地位, 美国、加拿大和德国等国家在该技术的基础研究与应用开发方面积累了丰富的经验. 相关研究主要聚焦于纳米材料对油水界面特性的调控作用: 当二氧化硅(SiO_2)、氧化铝(Al_2O_3)等纳米颗粒在驱油体系中达到临界浓度时, 油水界面张力可显著降低(降幅达40%~60%), 同时通过促进原油乳化和降低流体黏度来优化驱替动态. 实验数据证实, 采用定制化纳米颗粒配方的驱油体系, 其采收率较传统水驱技术可提升超过20%, 展现出显著的技术优势. 中国石油勘探开发研究院的科研人员设计出具有原位形成“纳米水”特性的纳米驱油剂——iNanoW. 这种神奇的液体如同微观世界的智能特工, 能进入纳米级孔隙进行驱油. 纳米智能驱油技术最终可将采收率从35%提升至60%以上, 最高可达80%~90%^[25]. 在油田现场试验方面, 中国石油长庆油田利用纳米微球调驱技术开发低渗透油藏, 使自然递减率下降1.8%, 含水率降低3.2%; 玉门油田“纳米水”技术使并组日产量从6.6 t提高至8.1 t, 含水率降至50%, 展现出较高的应用潜力.

3 化学驱技术面临的挑战及解决方案

3.1 资源储量的挑战

1999年, 我国开展了全国陆上油田提高采收率潜力评价工作. 评价结果表明(表2), 化学驱(包括聚合物驱和化学复合驱)适宜地质储量达50亿吨以上, 可提高采收率10%~19%, 增加可采储量7.85亿吨(占76.5%), 发展潜力巨大. 但经过二十余年的持续开发后, 适宜化学驱的地质储量越来越少. 以大庆油田为例, 其一类油层已全部动用, 二类油层已动用50%以上, 主要剩余储量集中在难开采的三类油层, 其储量达数十亿吨. 这说明开发对象从整装中高渗油藏向低渗透、复杂断块、强非均质砾岩等油藏拓展, 储层性质逐步变差, 因

此, 对提高采收率技术的要求也越来越高.

3.1.1 中高渗高含水油田

中高渗砂岩或砾岩储层是中高渗高含水油田的主要类型, 主要分布在渤海湾、西部等盆地, 其中长庆垣油田最为典型. 中高渗透油田历经多年开发, 储层含水率普遍高达90%以上, 可采储量采出程度也超过80%, 进入“双特高”阶段. 目前水驱和化学驱技术是有效开发此类油藏的主要技术, 虽然进入“双特高”阶段的此类油藏开发难度大, 但通过后续提高采收率获得的增油量非常可观. 以聚合物驱和三元复合驱为代表的三代提高采收率主体技术使主力油田采收率从早期水驱的30%分别提高到40%~60%以上, 但仍有三分之一以上的剩余油残留于储层中^[26]. 针对储层剩余油呈现高度弥散分布特征的开发瓶颈, 构建长效挖潜技术体系并实现采收率跨越式提升已成为核心攻关方向. 需持续攻关聚合物驱后提高采收率技术、化学混相驱技术、微生物驱技术, 加速建立“双特高”阶段开发主体技术迭代衔接架构, 为提高采收率提供关键技术支撑.

3.1.2 低渗透油田

我国低渗透油藏储量丰富, 主要分布在松辽、鄂尔多斯、渤海湾、准噶尔等盆地. 其中, 长庆油田是我国低渗透油藏增储上产的主战场, 通过深化基础研究、开展技术攻关与矿场实践、加快开采技术持续创新等方法, 打破了低渗透油藏开发的物性限制, 实现了动用储量增长的目标^[27]. 2024年长庆油田原油产量上升至 6000×10^4 t以上. 在提高采收率方面, 通过攻关化学多介质复合驱、渗吸采油和低相对分子质量二元复合驱技术, 能够有效提高长庆、吉林等低渗透油田采收率10%以上; 同时, 通过加强储备黏弹表面活性剂驱、微生物驱等接替技术, 可进一步大幅度挖潜低渗

表2 全国陆上油田提高采收率潜力评价结果(1999)

Table 2 Evaluation results of enhanced oil recovery potential in Chinese onshore oil fields (1999)

EOR方法	覆盖储量(亿吨)	提高采收率(%)	增加可采储量(亿吨)	增加可采储量比例(%)
化学复合驱	31.13	19.0	5.91	57.6
聚合物驱	18.89	10.3	1.94	18.9
注气驱	9.44	12.3	1.16	11.3
热力采油	5.43	23.0	1.25	12.2
合计	64.89	64.6	10.26	100

透油藏剩余油, 实现化学驱极限提高采收率目标。

3.1.3 复杂断块油田

复杂断块油田是指油田被断层分隔成多个独立的油气水系统或原油性质及压力系统各异, 含油面积小于 1.0 km^2 的断块地质储量占总储量 50% 以上的油田^[27]。复杂断块油藏构造比较复杂, 由于平面上断层把油藏切割为小而碎的断块, 因此难以通过常规布井形成井网的开发模式进行开采此类油藏。并且此类油藏一般含有多套油层和油水系统, 不同断块甚至同一断块不同层系之间往往都没有统一的油水界面, 从而使得油水关系非常复杂。此外, 断块油藏储层与流体物性差别较大。油藏中可能包含不同储层类型, 如低渗透、裂缝性等; 流体包括低黏原油、高含蜡、高含沥青等情况。这些特殊的地质条件与流体特征给此类油藏开发带来了难度。

我国渤海湾盆地胜利、冀东等油田的复杂断块油藏已整体进入“双特高”开发阶段。上述断块油田以传统水驱开发为主, 逐步开展了以二元复合驱、微生物驱、空气泡沫驱技术为主的先导试验^[27]。但整体来看, 由于此类油藏的苛刻条件限制, 提高采收率效果和效益仍有很大提升空间, 亟需针对不同油藏特点尽快形成相应的提高采收率的主体技术, 以实现复杂断块油藏差异化提速增效开发。

3.2 化学驱技术面临的挑战

3.2.1 地质-开发耦合作用下宏观剩余油富集规律复杂性

我国多数油田经过多年的开发已进入特高含水开发期, 已开发油田中高渗油藏平均采出程度为 36.6%, 低渗透油藏平均采出程度为 10.6%, 宏观剩余油呈现高度离散化分布特征。剩余油富集受控于地质-开发双因素耦合作用^[28]。地质条件包括地质构造、沉积微相和储层非均质性; 开发条件包括井网密度、井网模式、注采系统的完善程度、生产动态和开发方式等。根据剩余油富集区的形成条件将其划分以下 9 种类型^[29]: (1) 不规则大型砂体的边角地区, 或砂体被纵向或横向的各种泥质遮挡物形成的滞油区; (2) 岩性变化剧烈、主砂体边部变差部位及其周围呈镶边或搭桥形态的差储层或表外层; (3) 现有井网不能控制的小砂体; (4) 断层附近井网难以控制的部位; (5) 断块的高

部位、微构造起伏的高部位以及切叠型油层中的上部砂体; (6) 优势通道造成的未被水驱的部位及层间干扰形成的剩余油, 井间的分流线部位; (7) 正韵律厚层的上部; (8) 注采系统本身不完善或与砂体配置不良所形成的有注无采、有采无注或单向受效而遗留的剩余油; (9) 化学驱等提高采收率驱油体系波及后的残余油。由于宏观剩余油形成和分布受地质和开发因素相互叠加作用加大了对剩余油认识的难度, 因此研究人员需要加强攻关储层描述地质理论和方法技术, 精确描述井间/层内非均质、裂缝发育区, 从而准确预测剩余油流动与富集规律, 满足大幅提高采收率的需求。

3.2.2 微观剩余油启动机制及主控因素不明确

在油藏开发初期及低含水阶段, 无论从宏观还是微观角度, 剩余油赋存形态多以连续分布为主, 经过长期水驱及化学驱开发至特高含水阶段, 剩余油不仅在宏观上更加分散, 而且由于不同力学及物理化学成因作用, 表现出了不同的微观赋存形态(图 5a)^[30]。主要有黏附力影响的膜状剩余油、流线发展不充分造成的角隅状剩余油、受毛管力影响的喉道状剩余油和微观非均质造成的簇状剩余油(图 5b)。特高含水期受地层、岩石和流体等非均质因素综合影响, 剩余油微观分布和赋存形态更加复杂, 且目前不同赋存形态剩余油启动机制不明确, 因此研究人员需要从微观层面研究储层结构、物性和流体物理化学的作用关系, 进一步揭示剩余油启动机制(图 5c)。

3.2.3 绿色高效表面活性剂研发滞后

表面活性剂通过降低油水界面张力^[31]、乳化增溶携带原油^[32]、润湿性反转^[33]等方式提高驱油效率和扩大波及体积, 随着开发对象的拓展, 常规表面活性剂面临诸多挑战。首先是适应性。在高温、高盐等苛刻油藏条件下表面活性剂的稳定性和驱油效率大幅降低。其次是成本高。高性能的表面活性剂通常价格较高, 限制了其在油田大规模应用。此外, 考虑到部分化学剂会对环境造成一定的污染, 油田开采结束后残余化学剂的处理尤为关键。因此亟需迭代升级新一代超级表面活性剂, 增强表面活性剂的适应性、经济性和多功能性。

3.2.4 化学驱与人工智能技术融合缓慢

实验室评价技术是当前评估化学复合驱适应性的

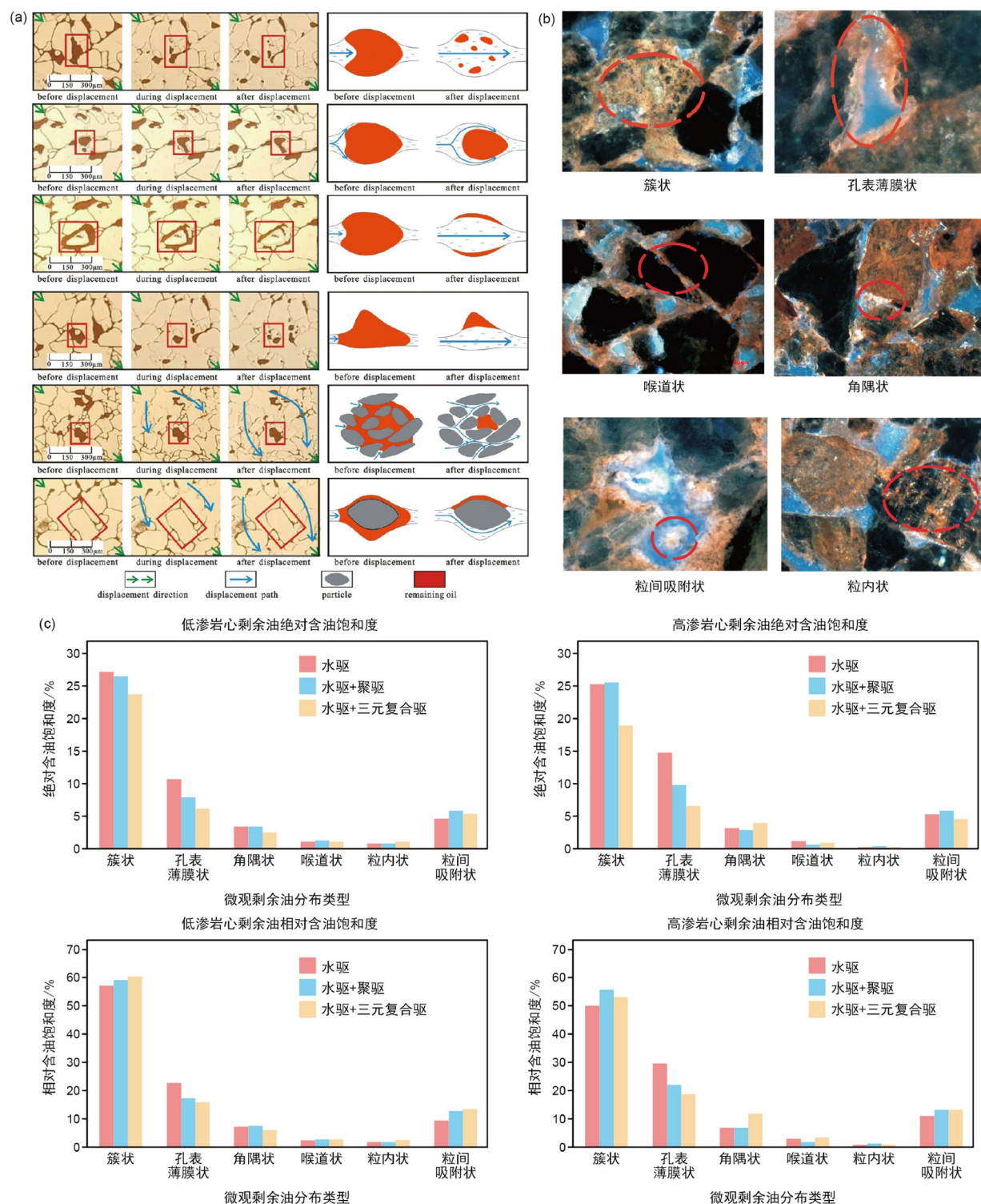


图 5 (网络版彩图) 不同类型剩余油分布. (a) 不同类型剩余油形成机制^[30]. (b) 岩石孔隙中剩余油^[28]. (c) 不同驱替方式的剩余油类型及含量^[28]

Figure 5 (Color online) Distribution patterns of diverse residual oil types. (a) Formation mechanisms of residual oil types^[30]. (b) Residual oil in rock pores^[28]. (c) Residual oil types and contents under different displacement methods^[28].

主要手段. 评价涵盖驱油剂与注入工艺两方面. 驱油剂评价聚焦其化学稳定性、流变性能以及与岩石、原油的相容性; 注入工艺评价则关注压力、速率、浓度和注入方式等参数. 完成评价后需优选适配特定油藏的驱油剂配方, 此过程工作量大, 显著增加了实验与操作成本. 因此, 亟需结合人工智能技术, 建立低成本、系统化的适应性评价与优化方法, 以加速化学驱技术的迭代升级. 人工智能不仅可实现驱油配方、注入参数与地层条件的快速匹配, 还可以构建表面活性剂分子结构与驱油效率之间的关联模型, 缩短研发周期, 提升筛选效率. 然而, 当前数据采集标准不统一、跨学科融合不足、模型可解释性有限, 仍是其大规模应用的障碍.

3.3 化学驱技术的创新解决方案

化学驱技术在油田高效开发过程中发挥着越来越重要的作用, 已经成为提升可采储量和保持原油产量稳定的重要技术手段. 面对资源品质劣质化、开采对象复杂化的客观现实, 迫切需要通过基础理论创新推动技术战略升级, 突破波及体积与驱油效率的双重瓶颈, 实现极限采收率目标(图6).

为此, 形成了以分级分类调堵、智能驱油体系、生物制造和机器学习为核心的协同技术体系. 通过“大

孔道长效封堵 + 优势通道分级调堵”技术实现全油藏均衡波及, 结合分子设计构建高效表面活性剂体系, 实现油滴剥离-聚并-油墙形成的动态调控, 并借助微胶囊技术实现靶向驱油. 通过合成生物学实现驱油剂绿色合成, 降低生产能耗与碳排放. 通过机器学习模型对海量数据进行高通量筛选和逆向设计, 快速优化驱油剂配方及注入参数. 该技术体系突破传统化学驱的技术瓶颈, 在提高驱油效率的同时显著降低成本, 正在推动油田开发向智能精准、绿色低碳方向转型.

3.3.1 基于分子设计的智能驱油体系

通过分子模拟技术探究表面活性剂剥离油滴机制, 深化认识驱油剂剥离油滴的力学机理^[34]. 基于不同官能团与油相和水相的相互作用, 优化驱油剂的分子结构, 在提高驱油效率的同时增强其在油水界面的稳定性. 优化的驱油剂分子能够在油水两相之间建立弹性链接桥梁, 在水相流动产生的剪切作用下, 油滴会从岩石表面剥离. 油滴表面附着的驱油剂会随着油滴运移环境的变化而智能脱落, 促使油滴相互接触并聚并, 最终形成油墙. 智能脱落下的驱油剂再次发挥智能找油功能, 寻找低饱和度区的剩余油, 能在高效分散剩余油后再次完成富集功能. 相比传统表面活性剂, 有望实现一次注入、多次利用等优势, 从而有效

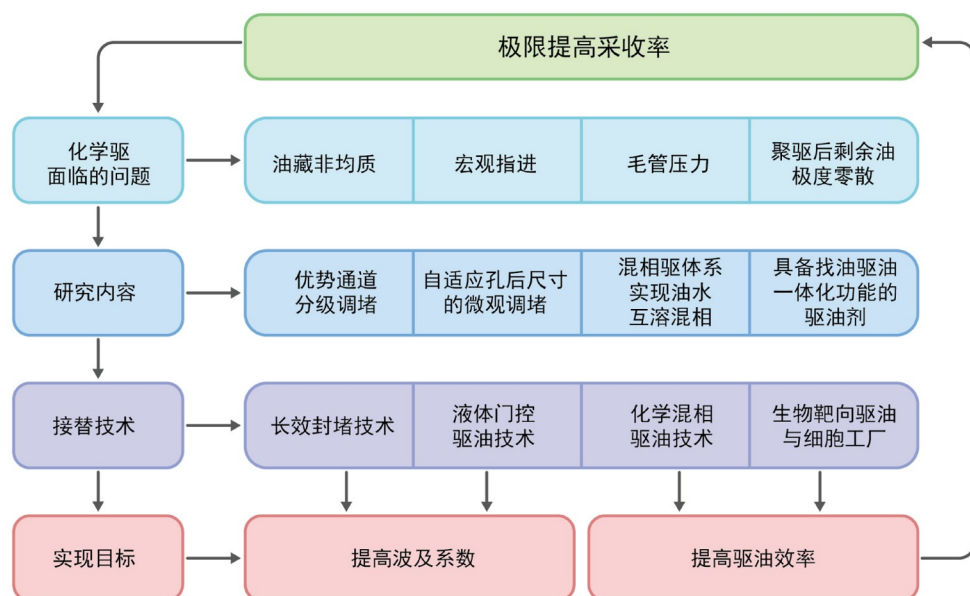


图 6 (网络版彩图)极限提高采收率技术内涵

Figure 6 (Color online) Technical connotation of ultimate EOR technology.

降低化学驱应用成本。

此外, 根据原油组分的化学特性, 以微生物、纳米材料、表面活性剂等作为载体, 借助微胶囊技术实现靶向智能驱油, 与传统表面活性剂体系相比, 靶向驱油体系能够减少表面活性剂在储层表面的吸附损耗, 在水相中自主向油相迁移, 智能寻找剩余油。当其聚集吸附在油水界面后, 能够增大界面两侧的相互作用能, 使油滴发生变形并高效剥离油膜。

3.3.2 分级分类调堵技术实现全油藏均衡波及

扩大波及的关键是实现多孔介质中多相流体可控流动。其需按照“大孔道长效封堵、优势通道分级调堵”的技术思路, 研发出长时长效的封堵技术以及分散相与连续相、界面膜等复合调剖调驱体系, 从而自适应封堵不同层级优势通道, 实现“宏观自适应、微观选择性”的均衡波及。

3.3.3 生物制造技术赋能驱油剂绿色生产

传统油田化学品以石油为原料合成获得。制备过程伴随着高耗能、高排放等问题, 而生物制造是利用微生物及廉价可再生农副产品进行大规模物质加工和制造的绿色生产方式。以生物制造技术赋能驱油剂合成技术研发, 将进一步提高化学驱生命力和竞争力。在明确化学剂分子结构与原油匹配关系的基础上, 设计、构建细胞工厂合成体系, 再通过进一步优化发酵工艺, 可以最大限度提高目标分子的产量和纯度。

3.3.4 基于机器学习的化学剂体系研发

机器学习模型通过处理庞大的数据集可有效筛选出具有特定性能的候选材料^[35], 甚至实现材料的逆向设计^[36], 这种能力极大地提升了开发新材料的效率。尤其是在高通量计算和实验的支持下, 机器学习使得材料设计的过程更加系统化和高效化^[37,38]。在开展化学驱适应性评价时可利用高通量筛选技术、深度学习等手段, 快速寻找适应复杂油藏环境的驱油剂配方并优化其注入参数, 提高驱油剂配方的筛选效率, 从而改善注入参数设计的科学性。

3.3.5 抗高温高盐聚合物结构设计和研发

高温高盐油藏化学驱技术面临的核心挑战在于常规聚合物(如HPAM)在极端条件下易发生分子链卷

曲、水解及热降解, 导致黏度保留率急剧下降。当前抗高温高盐聚合物的结构设计主要围绕以下方向展开。分子结构优化: 一方面, 通过共聚2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)等含磺酸基单体, 增强聚合物链的静电斥力和水化能力, 抑制二价离子($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$)引起的黏度损失。例如, 胜利油田研发的AP-P5缔合聚合物, 在矿化度 $3 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 、 85°C 条件下黏度保留率超80%。另一方面, 在聚合物主链引入疏水基团(如长链烷基), 通过动态物理交联形成可逆网络结构。该设计可在高温高盐环境下维持黏弹性, 如超高分多元共聚物在 30000 mg/L 矿化度下仍能保持 $15 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 表观黏度。未来研究中可借鉴劳伦斯伯克利实验室的机器学习方法, 加速筛选耐温单体组合, 如聚硫酸酯类材料的开发。

4 化学驱技术展望

4.1 分子设计

现代科学前沿技术的发展是提高油气田开发技术水平的关键驱动力。传统的油田开发理论是以渗流力学、物理化学等学科为基础, 适用于岩心到油藏的宏观尺度。随着油气田开采对象日趋复杂, 如特高含水老油田、页岩油气田及天然气水合物等, 研究人员亟需创新开发机理和方法以及设计更具针对性、经济性、绿色环保的驱油剂。因此, 研究人员需要从分子层面深入开展理论研究, 设计和操控功能用剂的分子结构, 实现技术的变革性进步^[39-41]。通过分子结构的设计、功能基团的调控改变驱油剂的性能, 从而适应不同的地层条件, 如乳化能力、亲疏水性、表面活性、耐温性和耐盐性等。

在稀油化学驱方面, 探索了分子类型和pH值等因素对表面活性剂的吸附特征、界面能、界面膜厚度和界面张力的影响规律, 明确了岩石表面粗糙度及水动力学条件等对油膜剥离效果的影响机制, 揭示了润湿性调控机理和油膜型剩余油剥离机理^[42]。此外, 在纳米颗粒剥离油膜、微乳液剥离油膜等方面也开展了相应研究^[43]。

在稠油化学驱方面, 研究人员通过量子化学计算、分子动力学模拟等手段研究了表面活性剂与胶质沥青分子间相互作用、稠油缔合致黏机理和表面活性剂降黏机理^[44]。计秉玉团队^[45]在分子设计上, 以油溶性碳骨架为基础, 引入了渗透性强的烷基侧链、能够

打开 π - π 堆积的苯环基团和具有多个氢键作用位点的羟基酰胺基团等. 另外, 为了增强降黏剂分子的回收再利用性能, 减少其对采出原油性质的影响, 设计了可接枝的磁性纳米粒子. 他们通过分子动力学计算, 优化纳米粒子类型、硅烷偶联剂及共聚单体的分子结构, 设计合成了可磁回收的高效油溶性降黏剂. 室内实验结果表明, 所设计的油溶性降黏剂在加量1.6% (降黏剂有效含量5%)时, 稠油油样(陈平油田, 黏度15632 mPa·s)表观降黏率为72.2%, 降黏剂室内磁回收率最高可达76.4%.

4.2 长效封堵技术

利用堵水调剖技术封堵优势通道, 可最大限度扩大后续驱替介质波及体积, 实现流线转变和流场调整. 中国石油勘探开发研究院技术团队从宏观和微观两个层面开展技术攻关, 以进一步提高化学驱波及效率. 在宏观层面, 攻关以超细水泥为主体的长效调堵技术^[46,47]. 该技术具有注得进、走得远、堵得住和封得久等特点, 以此建立了“插管桥塞+反向单流阀”注入管柱和储层临界破裂压力条件下的以压定排注入工艺(图7a). 在微观层面, 创新性地提出了液体门控驱油技术(图7b), 通过油水界面膜自组装、多孔介质孔喉尺寸及油固润湿性调控流体启动压力, 实现油水气等多相流体在微纳孔喉中选择性渗流, 从而提高微观波及体积.

近期, 研究团队基于液体门控模型开展了创新工作, 重点研究微纳尺度多相流体传输行为, 深入探究界面作用机制, 创造性提出液-液界面减阻核心机制. 该机制通过构造分子尺度动态平整液-液界面实现, 可

替代传统固液界面. 实验证明能有效降低流体运移阻力, 显著改善液体分散过程中的能耗问题. 研究进一步揭示多相界面热力学机制, 阐明了界面动力学作用规律, 明确了限域空间原油赋存特征, 确定了原油精准启动关键因素, 揭示了原油运移主要影响因素, 提出了界面-体相-孔喉协同调控新思路. 该思路可实现微纳孔隙内选择性渗流, 对油水气三相流动具有调控作用. 研究成果具有重要应用价值, 可指导微观剩余油极限采出, 为不同渗流空间开发提供理论支撑.

4.3 靶向驱油技术

借鉴靶向药物研发思路, 以高度分散剩余油为靶点, 沿程吸附损失少的胶囊型驱油剂展现出精准靶向定位与智能精准启动的独特优势. 与传统驱油剂相比, 该体系的靶向作用机制源于材料缓释特性与疏水亲油特性的协同效应, 作用原理主要涉及靶向找油和智能驱油^[48].

胶囊型靶向驱油剂是利用缓释或强憎水强亲油材料作为壳材, 内部封装具有原油趋向性的微生物或高效化学驱油剂作为芯材启动剩余油. 该结构能够避免菌体或化学驱油剂在地层环境中过早暴露导致的消耗, 保证驱油剂高效输运并实现智能找油. 若以运动性和趋油性强的微生物作为芯材, 胶囊体系能够起到智能找油、局部高浓度富集和高效驱油的作用, 从而有效启动高度分散的剩余油, 实现全油藏高效驱替. 微生物的趋化性是微生物通过对环境中的营养物质做出反应, 从而实现对其运动方向的选择性. 很多采油微生物对石油烃类都具有强烈的正趋化作用. 研究人员利用基因工程技术明显提升了铜绿假单胞菌、鞘氨醇单

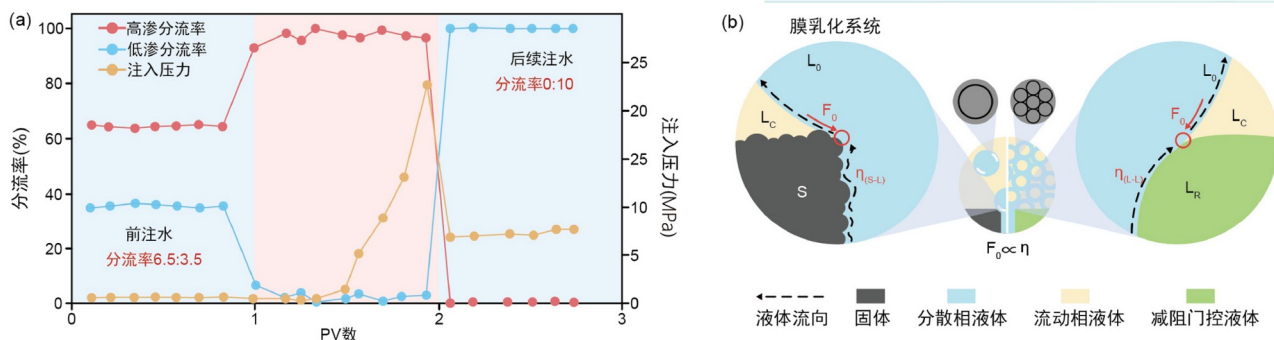


图7 (网络版彩图)长效封堵技术. (a) 并联双管模型超细水泥注入曲线. (b) 微观液体门控的技术原理图

Figure 7 (Color online) Long-term conformance control technology. (a) Injection curve of ultrafine cement in a parallel dual-tube model. (b) Schematic of the microscopic liquid-gating mechanism.

胞菌、丛毛单胞菌等微生物的烃类趋化性^[49,50]。同时, 西班牙生物医学研究中心用聚羟基脂肪酸酯(PHA)包装恶臭假单胞菌, 强化了菌株对温度、酸碱及强氧化剂环境条件的耐受能力^[51]。中国石油勘探开发研究院研制了以烃趋化性较强的铜绿假单胞菌为芯材的缓释型靶向驱油剂, 优化了胶囊型驱油剂合成工艺(图8a~c), 研制了高强度的智能靶向驱油剂, 实现了靶向释放和智能找油, 具备启动水驱或化学驱后高度分散剩余油的应用潜力。

4.4 细胞工厂合成驱油剂技术

细胞工厂技术是通过基因工程、代谢工程等手

段, 改造或定制微生物的遗传系统, 达到高效率生产天然或非天然化学品的目的^[52]。目前细胞工厂技术已经在多个领域取得产业化突破, 产品覆盖食品添加剂、医药、燃料和工业原料等多种类型, 如谷氨酸钠(味精)^[53]、青蒿素前体青蒿酸^[54]、生物柴油^[55]、1,4-丁二醇^[56]、PHA^[57]等。中国石油勘探开发研究院的技术研发团队^[58,59]将这项技术引入到提高采收率技术领域, 开展了微生物细胞工厂合成驱油剂技术攻关。他们以糖脂和脂肽类生物表面活性剂作为突破口, 系统开展了天然表面活性剂的基因组挖掘、合成途径解析和基因工程改造(图9), 实现了产物产率和驱油性能的进一步提升。细胞工厂合成驱油剂技术的核心是通过理

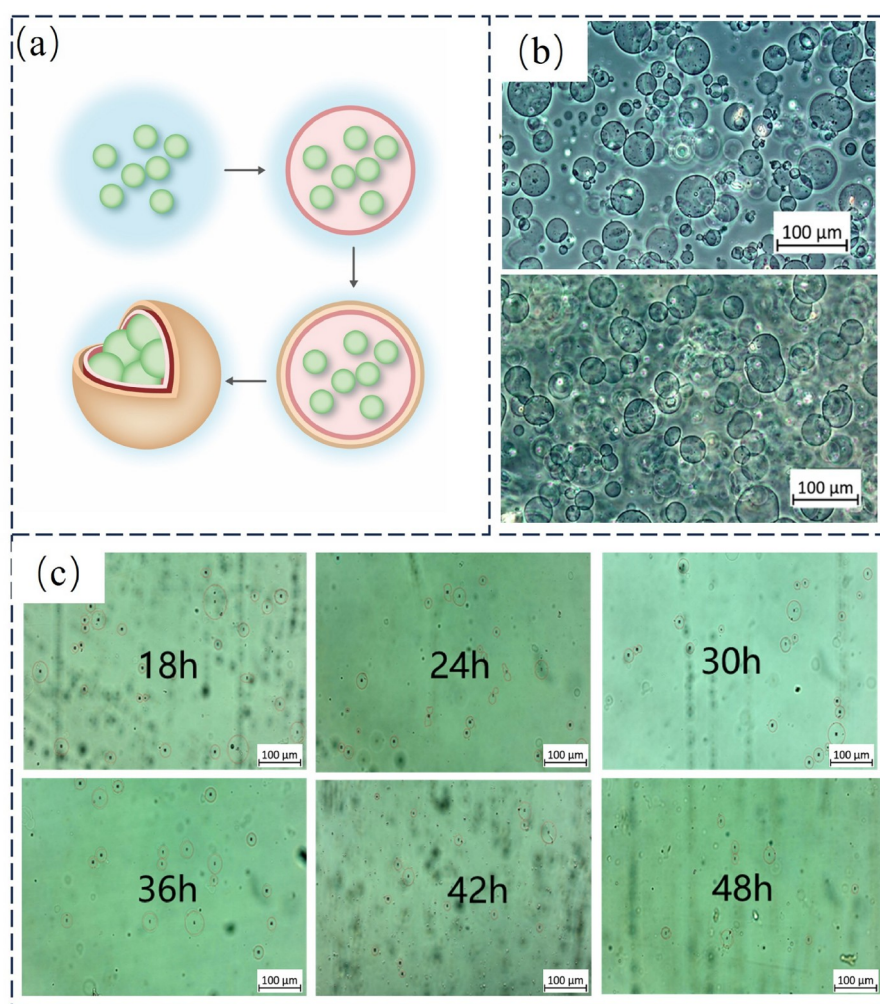


图8 (网络版彩图)靶向驱油剂合成及降解过程。(a) 静电自组装形成多壳胶囊。(b) 三层胶囊光学显微镜照片。(c) 大庆地层水降解试验

Figure 8 (Color online) Synthesis and degradation process of targeted oil-displacing agent. (a) Electrostatic self-assembly forming multishell capsules. (b) Optical micrograph of triple-layered capsules. (c) Degradation test in Daqing formation brine.

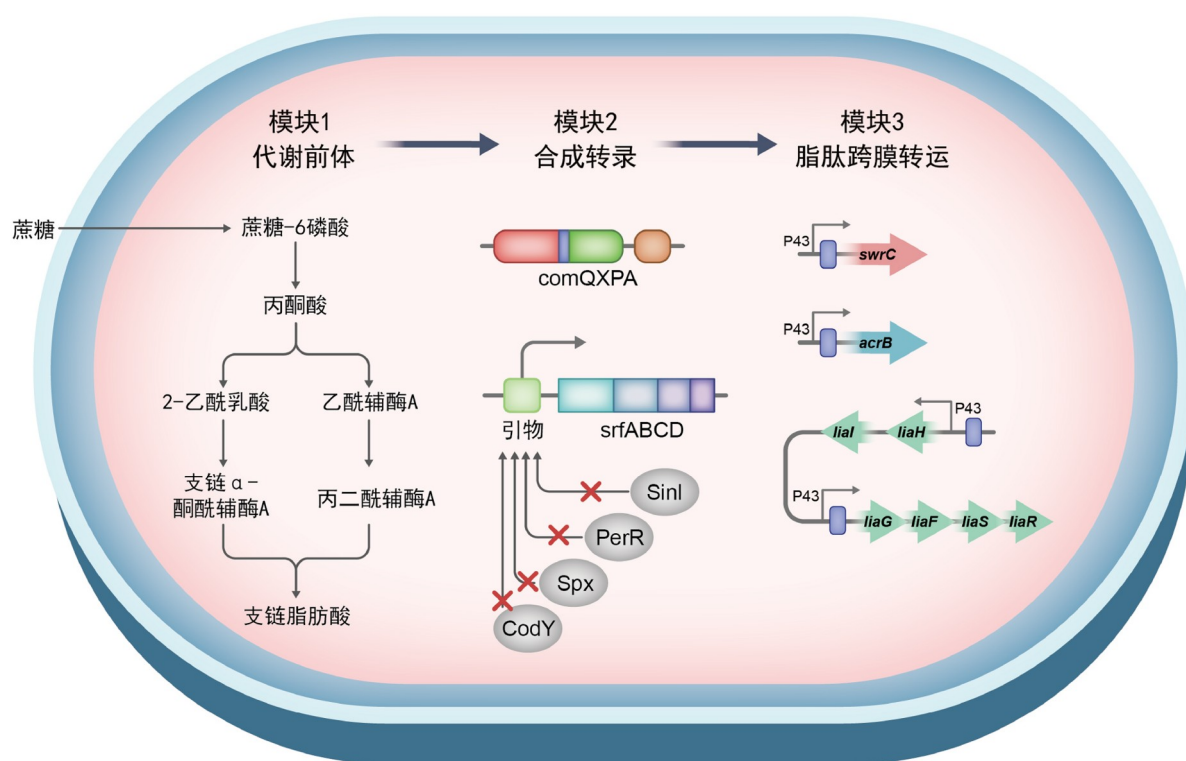


图 9 (网络版彩图)采油功能菌的改造策略

Figure 9 (Color online) Engineering strategies for functional bacteria in microbial enhanced oil recovery.

性的设计改造, 构建特定分子结构驱油剂的细胞合成体系, 实现最大限度提升产量以及合成化学法无法合成的新型分子结构的目标. 这项技术为突破传统发酵生产生物表面活性剂技术中长期未解决的产率低、驱油效率低以及成本高等瓶颈问题提供了全新的解决方案. 有望加速生物表面活性剂的工业化应用推广, 助推其逐步发展成为化学合成驱油剂的绿色替代产品.

4.5 化学混相驱油

化学混相驱是通过表面活性剂增溶聚并作用以“混相带”形式将“油墙”推至生产井, 驱油效率可达到90%以上. 混相驱驱油分为地下原位混相驱油和地面预制微乳液驱油两种类型, 近年来, 研究人员设计研发了一种界面扩展型表面活性剂, 在表面活性剂中引入弱亲水的环氧乙烷(EO)基团和弱亲油的环氧丙烷(PO)基团, 可提高界面膜的高斯模量. PO基团的引入保证了延长链在界面上的规则折叠, 增加了界面层厚度, 维持了油水界面的稳定性; EO基团的增加有利于链段在油水界面的延展, 提升界面的刚性. EO/PO共聚

物在油水界面上形成一层薄膜, 并逐渐将油相和水相分割在微小的区域内, 使其相互贯穿而构成网络, 从而形成双连续微乳液结构. 在这种结构中, 油相和水相不再是宏观上的分离状态, 而是以微观的、相互交织的形式存在, 这实现了油水互溶的效果, 达到了混相驱状态. 此技术在大庆、长庆、吉林、新疆等多个油田开展了先导试验, 展现出较为显著的应用能力.

4.6 人工智能驱动的化学驱智能化转型

近年来, 随着大数据技术、人工智能和深度学习算法的快速发展, 化学驱的研究逐渐从传统的实验室试验转向数据驱动的智能优化方案, 在实际应用中取得了突破. Mahdaviara等^[60]通过构建一个包含全球320多个低渗透性油藏提高采收率项目的数据库, 对218个油藏进行了分析, 此评估和筛选适用于低渗透性油藏的提高采收率方法. 该研究利用统计和机器学习技术, 包括随机森林(RF)、梯度提升机(GBM)、极端梯度提升(XGBoost)和基因表达编程(GEP), 开发了提高采收率技术筛选工具(图10a). 结果表明, 气体基

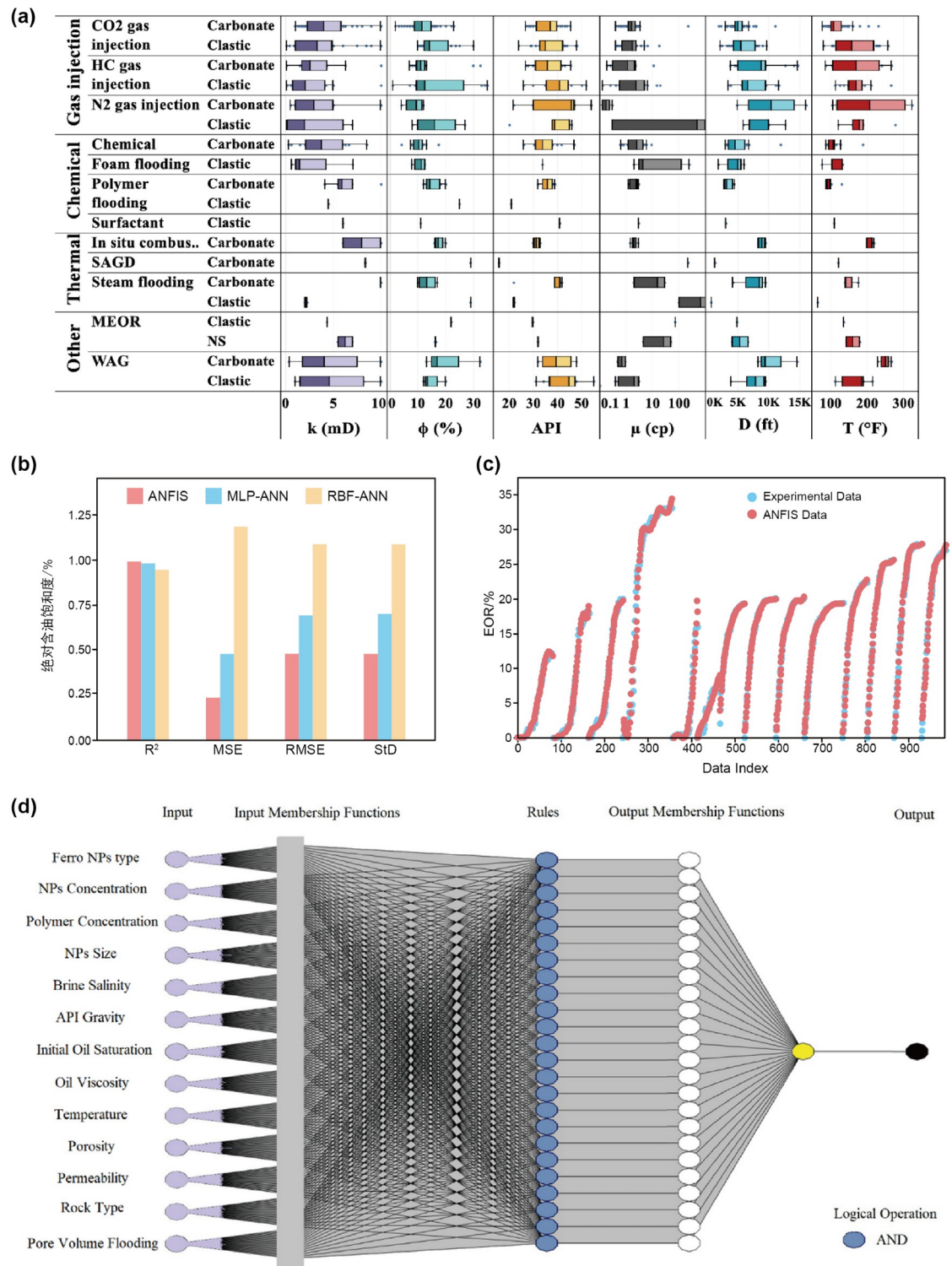


图 10 (网络版彩图)提高采收率预测模型. (a) 适用于低渗透油田的提高采收率方法筛选工具^[60]. (b) 提高采收率预测模型的性能评估^[61]. (c) 实验数据与ANFIS网络预测结果对比($R^2 = 0.9922$)^[62]. (d) 预测提高采收率过程的ANFIS最优网络^[62].
Figure 10 (Color online) EOR forecasting model. (a) The screening tool was developed for finding the best EOR approach suited to the low-permeability oilfields ^[60]. (b) Performances of the models used for the prediction of enhanced oil recovery ^[61]. (c) Comparison between experimental data and ANFIS network ($R^2 = 0.9922$) ^[62]. (d) The best adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) network to forecast the EOR process ^[62].

提高采收率技术在全球低渗透性油藏的开发中贡献最大, 开发的模型在预测适合低渗透性油藏的提高采收率技术方面表现出较高准确性.

Shayan等^[61]应用自适应神经模糊推理系统(ANFIS)、多层感知器-人工神经网络(MLP-ANN)和径向基函数-人工神经网络(RBF-ANN)三种机器学习算法, 对二氧化硅纳米流体驱油实验效率进行了预测. 他们以决定系数、均方根误差等指标评估性能. 结果显示, ANFIS模型表现最佳, 其在训练、测试和全部数据点上的决定系数分别达0.9954、0.9877和0.9939, 均方根误差分别为0.3395、0.4793和0.3793, 且其执行时间最短, 过拟合问题最少(图10b). Esmailnezhad等^[62]提出了基于机器学习的纳米铁在砂岩中驱油效率的预测. 研究使用支持向量机(SVM)进行分类, 以及多层感知器(MLP)、RBF和ANFIS(图10d)进行回归分析. 结果表明, SVM能够准确分类数据, MLP和ANFIS模型在预测回收因子方面表现出较高的 R^2 值(拟合系数值, 0.9957和0.9922)(图10c). Çolak和Onaizi^[63]提出了利用机器学习方法, 特别是人工神经网络(ANN)模型, 预测生物表面活性剂的界面张力和流变学. 研究中使用了四种不同的ANN模型, 分别用于不同的输入参数, 如生物表面活性剂用量、油/水体积比和温度. 模型的平均偏差(MoD)值约为0.004%, 这表明实验结果与预测值之间的误差极小.

5 总结与展望

经过几十年的攻关与探索, 化学驱技术已经成为国内中、高渗油藏大幅度提高采收率的主要技术, 对油田开发的可持续发展和保持原油长期稳产做出了突出贡献.

随着油气资源品质劣质化趋势加剧和开采对象复杂程度升级, 现有技术体系面临剩余油赋存状态复

杂、微观启动机制不明确、采收率提升幅度受限等挑战, 亟需从基础理论创新和技术体系重构两个维度实现突破. 未来应聚焦波及体积扩展与驱油效率提升双路径, 通过分级调堵实现全油藏均衡驱替, 结合智能驱油剂设计与生物工程-数智化协同优化, 实现极限提高采收率.

建议进一步完善宏观/微观层面封堵定量表征方法, 揭示宏观长效强封堵与微观选择性可控封堵的关键作用机制, 研发系列强度智能/原位封堵体系, 建立物模数模一体化的驱油体系-优势通道匹配模型, 构建不同体系与不同优势通道的匹配图版, 形成可控智能微观封堵技术, 实现全油藏尺度、全开发周期极限波及.

建议加强微生物趋向性和缓释胶囊技术的研究, 开发具有精准靶向识别与可控释放功能的胶囊型驱油剂, 以提高靶向驱油剂的精准吸附和释放效率. 同时, 进一步优化微生物细胞工厂技术, 通过合成生物学和代谢工程改造, 提升细胞生产驱油剂的能力、降低成本, 构建环境友好型生物制造技术体系, 推动石油开采的环保转型和可持续发展.

建议优化化学混相驱油技术和工艺集成, 以实现驱油效率的最大化和经济效益的最优化. 深入研究与开发低浓度表面活性剂、界面扩展型表面活性剂等新技术, 提升油水混相效果. 通过优化注入工艺、精细调控混相带的形成和扩展, 在不同类型的油藏中实现更大规模的混相驱油, 从而显著提高采收率, 提升化学驱技术的应用效果.

建议推动化学驱技术与人工智能深度融合, 构建涵盖油藏特征-化学剂性能-开发动态的多维度数据库, 开发基于机器学习的驱油剂逆向设计平台与注入参数优化系统, 实现化学驱技术方案的智能化迭代升级. 通过持续创新与集成优化, 形成化学驱提高采收率领域的核心竞争力与战略接替技术, 强力支撑中国原油长期稳产.

参考文献

- 1 Qian XK, Lu RQ. 2024 Oil and Gas Industry Development Report (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2024 [钱兴坤, 陆如泉. 2024年国内外油气行业发展报告. 北京: 石油工业出版社, 2024]
- 2 Xue L, Liu P, Zhang Y. *Water*, 2023, 15: 1342
- 3 Nyah F, Ridzuan N, Ikechukwu Nwaichi P, Ummunawuike C, Agi A. *J Mol Liquids*, 2024, 415: 126308
- 4 Long K, Tang Y, He Y, Luo Y, Hong Y, Sun Y, Rui Z. *Energy*, 2024, 293: 130724

- 5 Yonebayashi H, Yoshida S, Ono K, Enomoto H. *Sekiyu Gakkaishi*, 2000, 43: 59–69
- 6 Zhao DW, Wang J, Gates ID. *Fuel*, 2014, 117: 431–441
- 7 Guo SP, Tian GL, Wang F, Lei QH, Tao C. *Acta Pet Sin*, 1997, 4: 49–53 (in Chinese) [郭尚平, 田根林, 王芳, 雷巧会, 陶诚. 石油学报, 1997, 4: 49–53]
- 8 Liao GZ, Wang Q, Wang HZ, Liu WD, Wang ZM. *Acta Pet Sin*, 2017, 38: 196–207 (in Chinese) [廖广志, 王强, 王红庄, 刘卫东, 王正茂. 石油学报, 2017, 38: 196–207]
- 9 Sun LD, Wu XL, Zhou WF, Li XJ, Han PH. *Petrol Explor Dev*, 2018, 45: 636–645 (in Chinese) [孙龙德, 伍晓林, 周万富, 李学军, 韩培慧. 石油勘探与开发, 2018, 45: 636–645]
- 10 Liu H. *Petrol Explor Dev*, 1995, 2: 64–67 (in Chinese) [刘恒. 石油勘探与开发, 1995, 2: 64–67]
- 11 Li GC. *Oilfield Chem*, 2023, 40: 175–181 (in Chinese) [李广超. 油田化学, 2023, 40: 175–181]
- 12 Sun HQ. *Pet Sci Technol Forum*, 2021, 40: 1–7 (in Chinese) [孙焕泉. 石油科技论坛, 2021, 40: 1–7]
- 13 She WC. *Petrochel Ind Technol*, 2020, 27: 131–133 (in Chinese) [余文昌. 石化技术, 2020, 27: 131–133]
- 14 Li HS, Tang JX, You Y, Yan YF, Zhu YF, Yu QZ. *Pet Geol Eng*, 2018, 32: 87–91 (in Chinese) [李洪生, 唐金星, 尤越, 闫永芳, 朱益锋, 余庆中. 石油地质与工程, 2018, 32: 87–91]
- 15 Cheng JC, Wu JZ, Hu JQ. *Acta Pet Sin*, 2014, 35: 310–318 (in Chinese) [程杰成, 吴军政, 胡俊卿. 石油学报, 2014, 35: 310–318]
- 16 Cao XL, Shi J, Zhang L, Liu Y, Gong JC, Zhang WL, Zhang N. *Pet Geol Recover Eff*, 2024, 31: 16–26 (in Chinese) [曹绪龙, 石静, 张磊, 刘煜, 巩锦程, 张文龙, 张娜. 油气地质与采收率, 2024, 31: 16–26]
- 17 Zhu YY, Hou QF, Jian GQ, Ma DS, Wang Z. *Petrol Explor Dev*, 2013, 40: 90–96 (in Chinese) [朱友益, 侯庆峰, 简国庆, 马德胜, 王哲. 石油勘探与开发, 2013, 40: 90–96]
- 18 Ivanov MV, Belyaev SS, Borzenkov IA, Glumov IF, Ibatullin RR. *Dev Pet Sci*, 1993, 39: 373–381
- 19 Belyaev SS, Borzenkov IA, Nazina TN, Rozanova EP, Glumov IF, Ibatullin RR, Ivanov MV. *Microbiology*, 2004, 73: 590–598
- 20 Ma T, Chen Y. *J Microbiol*, 2018, 38: 1–8 (in Chinese) [马挺, 陈瑜. 微生物学杂志, 2018, 38: 1–8]
- 21 Shan LT. Imbibition and oil displacement mechanism of micro-nano pores in tight reservoir (in Chinese). *Dissertation for the Master's Degree*. Beijing: China University of Geosciences, 2021 [单连同. 致密油藏微纳米孔隙渗吸作用与驱油机理研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学, 2021]
- 22 Wang J, Luo X, Zeng JG, Jiang HS, He DY. *J Yangtze Univ (Nat Sci Ed)*, 2023, 20: 66–73 (in Chinese) [汪杰, 罗旭, 曾建国, 江厚顺, 贺东洋. 长江大学学报(自然科学版), 2023, 20: 66–73.]
- 23 Li SS, Feng Q, Li XN, Song XL, Bai Y, Chen ZY. *Spec Petrochem*, 2025, 42: 16–21 (in Chinese) [李胜胜, 冯青, 李啸南, 宋学玲, 柏溢, 陈哲永. 精细石油化工, 2025, 42: 16–21]
- 24 Feng B, Wang YD, Yang PH, Xie XH, Yu JH, Zhang XW. *Min Eng*, 2025, 13: 394–402 (in Chinese) [封奔, 王月荻, 杨丕辉, 谢晓惠, 于季灏, 张烜玮. 矿山工程, 2025, 13: 394–402]
- 25 Wang XC. Research on oil displacement mechanism of nano-oildisplacement agent (in Chinese). *Dissertation for the Doctoral Degree*. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021 [王小聪. 纳米驱油剂驱油机理研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2021]
- 26 Ahmadi MA, Shadizadeh SR. *J Pet Sci Eng*, 2013, 112: 239–247
- 27 Yuan SY, Wang Q. *Petrol Explor Dev*, 2018, 45: 657–668 (in Chinese) [袁士义, 王强. 石油勘探与开发, 2018, 45: 657–668]
- 28 Xu QH. *Pet Geol Oilfield Dev Daqing*, 2019, 38: 110–116 (in Chinese) [徐清华. 大庆石油地质与开发, 2019, 38: 110–116]
- 29 Han DK. *Acta Pet Sin*, 2007, 2: 73–78 (in Chinese) [韩大匡. 石油学报, 2007, 2: 73–78]
- 30 Zhang Y, Zhao P, Cai M, Lu F, Wu X, Guo Z. *J Pet Sci Eng*, 2020, 193: 107330
- 31 He T, Li Y, Zhao J, Chen J, Yang M, Wang Y, Huang Z, Wang S. *Chem Eng J*, 2025, 507: 160560
- 32 Zhao XZ, Liao GZ, Gong LY, Luan HX, Chen QS, Liu WD, Liu D, Feng YJ. *Pet Sci*, 2022, 19: 870–881
- 33 Morrow NR. *J Pet Tech*, 1990, 42: 1476–1484
- 34 Fu L, Gu F, Liao K, Wen X, Jiang L, Li X, Huang W, Shao M. *J Mol Liquids*, 2022, 367: 120404
- 35 Vaziri P, Ahmadi S, Daneshfar F, Sedaei B, Alimohammadi H, Rasaei MR. *SPE J*, 2024, 29: 4557–4578
- 36 Liu Y, Cui Y, Zhou H, Shen T, Lei S, Yuan H, Yin J. *Curr Med Chem*, 2025, 82: 1463–1492
- 37 Tao Q, Yu JX, Mu X, Jia X, Shi R, Yao Z, Wang C, Zhang H, Liu X. *Sci China Mater*, 2025, 68: 387–405
- 38 Al-Khafaji HF, Meng Q, Hussain W, Khudhair Mohammed R, Harash F, Alshareef AlFakay S. *Fuel*, 2023, 354: 129263

- 39 Kharazi M, Saïen J, Torabi M, Zolfigol MA. *Pet Sci*, 2023, 20: 3530–3539
- 40 Martínez-Magadán JM, Cartas-Rosado AR, Oviedo-Roa R, Cisneros-Dévora R, Pons-Jiménez M, Hernández-Altamirano R, Zamudio-Rivera LS. *J Mol Graphics Model*, 2018, 80: 264–271
- 41 Jiang F. Salt-resistant supramolecular polymer: synthesis, salt effect, and flow characteristic research (in Chinese). *Dissertation for the Doctoral Degree*. Chengdu: Southwestern Petroleum University, 2018 [姜峰. 抗盐超分子聚合物的合成、盐效应及流动特性研究. 博士学位论文. 成都: 西南石油大学, 2018]
- 42 Cao G, Cheng Q, Liu Y, Bu R, Zhang N, Wang P. *ACS Omega*, 2022, 7: 19010–19020
- 43 Tang W, Zou C, Liang H, Da C, Zhao Z. *J Pet Sci Eng*, 2022, 214: 110458
- 44 Xu J, Wang N, Xue S, Zhang H, Zhang J, Xia S, Han Y. *Fuel*, 2022, 310: 122270
- 45 Ji BY, Fang JC, Yang S, Hu Y. *Oil Gas Geol*, 2023, 44: 195–202 (in Chinese) [计秉玉, 方吉超, 杨书, 胡勇. 石油与天然气地质, 2023, 44: 195–202]
- 46 Sarkar SL, Wheeler J. *Cement Concrete Res*, 2001, 31: 119–123
- 47 Mangadlao JD, Cao P, Advincula RC. *J Pet Sci Eng*, 2015, 129: 63–76
- 48 Wang S, Zhang Q, Xiu J, Ma Y, Huang L, Yi L, Fu H. *Micro Nano Lett*, 2024, 19: e70000
- 49 Dong W, He C, Li Y, Huang C, Chen F, Ma Y. *Gene Rep*, 2017, 7: 123–126
- 50 Ni B, Huang Z, Wu YF, Fan Z, Jiang CY, Liu SJ. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2015, 99: 2773–2781
- 51 González E, Herencias C, Prieto MA. *Microb Biotechnol*, 2020, 13: 185–198
- 52 Kondo A, Ishii J, Hara KY, Hasunuma T, Matsuda F. *J Biotechnol*, 2013, 163: 204–216
- 53 Guo Y, Liu Y, Yang Z, Chen G, Liang Z, Zeng W. *Appl Biochem Biotechnol*, 2024, 196: 1527–1543
- 54 Singh D, McPhee D, Paddon CJ, Cherry J, Maurya G, Mahale G, Patel Y, Kumar N, Singh S, Sharma B, Kushwaha L, Singh S, Kumar A. *Org Process Res Dev*, 2017, 21: 551–558
- 55 Wan Osman WNA, Rosli MH, Mazli WNA, Samsuri S. *Carbon Capture Sci Tech*, 2024, 13: 100264
- 56 Qin N, Zhu F, Liu Y, Liu D, Chen Z. *ACS Synth Biol*, 2024, 13: 351–357
- 57 Raza ZA, Abid S, Banat IM. *Int Biodeterior Biodegrad*, 2018, 126: 45–56
- 58 Xu Y, Jing Y, Zhang Q, Xiu J, Tian M, Cui Q, Ma Y, Yi L, Han L, Qian Y, Zhang Y, Nie Y, Wu XL. *Microorganisms*, 2023, 11: 1182
- 59 Xu Y, Jing Y, Zhang Y, Liu Q, Xiu J, Zhang K, Jia N, Zhou M, Zhou X, Huang J, Nie Y, Wu XL. *Microorganisms*, 2022, 10: 2216
- 60 Mahdaviara M, Sharifi M, Ahmadi M. *Fuel*, 2022, 325: 124795
- 61 Shayan Nasr M, Shayan Nasr H, Karimian M, Esmailnezhad E. *Nat Resour Res*, 2021, 30: 2529–2542
- 62 Saberi H, Karimian M, Esmailnezhad E. *Eng Appl Artif Intelligence*, 2024, 132: 107908
- 63 Çolak AB, Onaizi SA. *Pet Res*, 2025, 10: 474–484

Paths to ultimate enhanced oil recovery by chemical flooding

Weifeng Lv^{1,2}, Yuan Li^{1,2}, Qun Zhang^{1,2*}, Bin Ding^{1,2}, Zhaohui Zhou^{1,2}, Jianlong Xiu^{1,2}, Xinyuan Zou^{1,2}

¹ Research Institute of Petroleum Exploration & Development, CNPC, Beijing 100083, China

² State Key Laboratory of Enhanced Oil & Gas Recovery, Beijing 100083, China

*Corresponding author (email: zhangqun1980@petrochina.com.cn)

Abstract: Chemical flooding remains a key technology for enhancing oil recovery in China's medium- and high-permeability reservoirs, playing a critical role in sustaining crude production and ensuring long-term oilfield viability. This paper reviews the evolution of chemical flooding technologies, examines current technical bottlenecks, and outlines a strategic framework for maximizing oil recovery. Over the past decades, substantial progress has been made, with the polymer flooding, surfactant-polymer (SP) flooding, and alkali-surfactant-polymer flooding evolving into mature industrial applications. However, as reservoir development advances, new challenges have emerged, including increasing reservoir heterogeneity, complex microscopic residual oil distribution, and limitations in surfactant adaptability. Overcoming these challenges requires a deeper understanding of fundamental mechanisms and continuous technological innovation to further enhance recovery efficiency. Moving forward, breakthroughs in intelligent targeting, chemical miscibility enhancement, and adaptive flow control-leveraging artificial intelligence and data-driven optimization be essential to unlocking the full potential of chemical flooding and pushing limited enhanced oil recovery performance toward its theoretical limits.

Keywords: chemical flooding, ultimate enhanced oil recovery, reservoir development, artificial intelligence

doi: [10.1360/SSC-2025-0170](https://doi.org/10.1360/SSC-2025-0170)