

引用格式:束青林,胡婧,汪卫东,等.生物化学复合提高采收率技术研究进展及发展趋势[J].油气地质与采收率,2024,31(5):27-37.

SHU Qinglin, HU Jing, WANG Weidong, et al. Research progress and development trend of biochemical composite enhanced oil recovery technology[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(5): 27-37.

生物化学复合提高采收率技术研究进展及发展趋势

束青林¹, 胡婧², 汪卫东¹, 林军章², 于田田², 张仲平², 殷方好², 郑万刚²

(1. 中国石化胜利油田分公司, 山东 东营 257000; 2. 中国石化胜利油田分公司 石油工程技术研究院, 山东 东营 257000)

摘要:系统调研了中外近10 a来在生物化学复合提高采收率技术方面的室内研究及现场应用进展,分别从提高洗油效率和扩大波及体积2方面,就采油菌体、生物表面活性剂、生物多糖分别与表面活性剂、聚合物、纳米颗粒等化学采油制剂间的协同作用机理,体系构建及现场应用效果进行了分析。研究表明:生物菌体及其代谢产物与化学采油制剂复合后,在界面张力降低、乳化分散、流度比控制和稠油降黏等方面都具有协同增效作用,现场应用也取得了良好的效果,其中胜利油田探索了菌体复合聚合物调剖技术及微生物脱硫保黏技术,预测提高采收率分别为9%和10.3%,大庆油田开展生物表面活性剂三元复合驱现场应用,先导区提高采收率达到22%。生物化学复合提高采收率技术在老油田难采储量动用方面具有巨大的应用前景。下一步需继续深化生物、化学体系间协同增效机理,根据油藏平面及层间、层内的差异,创新生物、化学采油体系复合及实施工艺,细化不同开发阶段、不同油藏空间的实施方案,通过油藏立体均衡开发,最大限度发挥生物与化学复合增效技术优势,满足老油田可持续开发的需求。

关键词:生物化学复合采油;协同增效;洗油效率;波及体积;脱硫保黏

文章编号:1009-9603(2024)05-0027-11

DOI:10.13673/j.pgre.202406017

中图分类号:TE376

文献标识码:A

Research progress and development trend of biochemical composite enhanced oil recovery technology

SHU Qinglin¹, HU Jing², WANG Weidong¹, LIN Junzhang², YU Tiantian²,
ZHANG Zhongping², YIN Fanghao², ZHENG Wangang²

(1. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China; 2. Institute of Petroleum Engineering and Technology, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

Abstract: This paper systematically investigated the progress of laboratory research and field application of biochemical composite enhanced oil recovery technology in the past 10 years in China and abroad. The synergistic mechanism between oil recovery bacteria, biosurfactants, biopolysaccharides, and chemical oil recovery agents such as surfactants, polymers, and nanoparticles was discussed in terms of improving displacement efficiency and expanding swept volume, respectively. In addition, the system construction and field application effects were analyzed. The results show that the combination of biological bacteria and their metabolites with chemical oil recovery agents has synergistic effects on interfacial tension reduction, emulsification dispersion, mobility ratio control, and viscosity reduction of heavy oil, and the field application has achieved good application results. Bacteria polymer composite profile control and microbial desulfurization and viscosity preservation technologies were explored in Shengli Oilfield, and estimated recoveries reached 9% and 10.3%, respectively. Biological ASP composite technology was applied in Daqing Oilfield,

收稿日期:2024-06-11。

作者简介:束青林(1966—),男,江苏丹阳人,正高级工程师,博士,从事油田开发地质及提高采收率技术研究与管理工。E-mail:shuqinglin.slyt@sinopec.com。

通信作者:胡婧(1980—),女,河南许昌人,研究员,博士。E-mail:hujing861.slyt@sinopec.com。

基金项目:山东省泰山产业创新项目“生物化学复合提高难采稠油采收率技术创新及产业化”,国家重点研发计划“油田采油生物制剂研发及应用”(2022YFC2105200)。

and the recovery of the pilot area has been improved to 22%. The biochemical composite enhanced oil recovery technology has great potential for application in the exploitation of difficult-to-recovery reserves in mature oilfields. The next step is to continue to deepen the synergistic mechanism between biological and chemical systems, innovate the integration and implementation process of biological and chemical oil recovery systems according to the differences between reservoir planes and inter- and intra-layers, refine the implementation plan for different development stages and reservoir spaces, and maximize the advantages of biological and chemical synergistic efficiency enhancement technologies through the three-dimensional balanced development of reservoirs to satisfy the demand for sustainable development of mature oilfields.

Key words: biochemical composite oil recovery; synergistic efficiency enhancement; displacement efficiency; swept volume; desulfurization and viscosity preservation

随着全球经济的飞速发展,能源需求持续增长,石油和天然气资源仍是世界能源消耗的主要来源^[1-2]。现阶段,中外大部分老油田已进入开发后期,常规储量资源占比减少,边底水、低渗透敏感、高温高盐等难采稠油油藏已成为资源开发“压舱石”的主要阵地,这些油藏开发矛盾复杂,普遍存在储层物性差、原油黏度高、含水率高、采出程度低等问题,常规水驱、热采无法实现效益开发。面对目前老油田可持续效益开发难题,中外能源机构开发出一系列提高采收率技术,如化学采油、气体采油、微生物采油等^[3-4]。不同提高采收率技术具有其独特的优势和适应范围,但都存在一定的局限性,尤其是面对复杂难采油藏时,单一技术无法有效解决所有的油藏开发矛盾。通过多种开发技术组合,在不同时间和空间上发挥各自技术的优势,互补短板,打造长板,是实现老油田可持续效益开发的一条技术思路。

近几年,稠油化学、生物降黏冷采技术在难采稠油转换开发方式现场实践中展现出良好的应用前景^[5]。胜利油田在实施过程中发现,生物、化学采油技术具有自身的优势但也存在一定的局限性,单独应用时提高采收率幅度有限。生物化学复合提高采收率技术是一项极具潜力的提高采收率技术研究方向,中外相关研究机构也在该领域开展了一些室内研究及现场探索,通过生物和化学采油体系间的物质协同、机理协同和时空协同有效解决高效洗油、扩大波及的难题^[6]。系统总结了近10 a来微生物与化学采油通过复合协同提高采收率领域的相关研究及现场应用进展,明确了下一步生物化学复合提高采收率技术研究的发展趋势,为中国老油田减碳绿色高效开发指明了技术方向。

1 化学及微生物采油技术概况

1.1 化学采油技术

化学采油技术是目前应用最广泛也是公认最

有效的三次采油技术,通过向地层注入不同功能的化学采油制剂来提高洗油效率及扩大波及范围,化学采油体系主要包括表面活性剂类、聚合物类、纳米颗粒类等。提高采收率机理包含岩石润湿性改善、调控流度比、乳化分散、降低界面张力等^[7-9]。化学采油技术提高采收率幅度大,但也存在一定的局限性,大多数表面活性剂类、聚丙烯酰胺类等化学采油制剂都是利用石化产品通过有机化学合成生产的,成本高且单体有一定的毒害性,其次,化学采油制剂在高温高盐油藏的适应性有限。“十三五”以来,胜利油田加大低效稠油油藏化学降黏冷采技术研究,通过研发新型多功能化学采油制剂,形成了以“强调驱、强降黏、强防膨、强活性、强增溶”为核心的稠油化学降黏复合驱技术^[10-12],功能性化学采油制剂普通稠油降黏率达到95%以上,洗油率为50%以上,在质量浓度为3 000 mg/L, 50 °C条件下表观黏度达到300 mPa·s,物理模拟提高驱油效率15%。成功推广到多轮次热采后、低渗透敏感、高温高盐等难采油藏,覆盖地质储量为 $1\ 500\times 10^4$ t,提高采收率7%左右,有效支撑了低效稠油油藏的变革性效益开发^[13]。

通过多年现场实践发现,化学采油技术的优势在于适应原油黏度范围广、降黏效率高、聚合物类驱油剂流变性能好,可调整宏观非均质性;局限性在于化学类降黏剂化学表面活性剂吸附量大、生产成本低,会对环境造成污染,化学聚合物耐温抗盐性能相对较弱,在中低渗透油藏注入性差,窜聚后的接替开发难度大^[14]。

1.2 微生物采油技术

微生物采油技术是一项新型的绿色低碳提高采收率技术,通过生物采油菌及其产生的活性代谢产物与原油和储层相互作用,提高原油采收率。微生物采油技术符合国家“双碳”发展战略,并因其无毒环保、发酵低成本、生物降解性、操作简便等优势逐渐成为石油开发领域的研究热点^[15-16]。近年

来,微生物采油技术快速发展,现场取得了一定的应用效果,但还未实现大规模的推广应用。

“十三五”期间,胜利油田通过大量室内研究总结了微生物采油“嗜烃改质降黏,多糖增黏调驱,厌氧产气助驱,润湿改性减阻,矿物改性防膨、生物竞争脱硫”6大主导机理。其中普通稠油生物改质降黏率达到90%以上,生物多糖体相黏度达到100 mPa·s以上,产气速率提高3倍以上,生物润湿改性后稠油在界面上的渗流阻力降低70%以上,敏感矿物改性菌室内20 d缩膨率达到20%以上,生物脱硫速率大于0.3 mg/(L·h)。近5 a胜利油田已实现微生物采油技术在高含水、低渗透敏感、深层稠油油藏的示范应用,采收率提高5%以上,增油量突破 20×10^4 t^[17-18]。

研究发现微生物采油技术的优势在于生物采油菌具有趋化性,能够主动向油水、固液界面富集^[19],在油藏原位生长代谢并与原油及储层高效作用,菌体嗜烃降黏可以改变稠油重质组分的分子结构,是一种改质降黏^[20],局限性在于菌体嗜烃降黏效率慢且适应稠油黏度范围窄,菌体运移及生长对微观波及有改善作用但无法调整宏观强非均质性;生物制剂方面,生物多糖、生物表面活性剂等生物采油制剂,发酵成本低,耐温抗盐性好,可被生物降解,具有环境友好性,缺陷在于生物表面活性剂的界面活性较弱,单独使用无法达到超低界面张力,生物多糖黏性高但弹性弱^[21-22];这些局限性在一定程度上制约了微生物采油技术的规模化应用^[23-24]。

2 生物化学复合提高采收率技术研究进展

2.1 提高洗油效率方面

2.1.1 菌体复合表面活性剂

化学表面活性剂是主要的采油制剂,大量研究表明阳离子和非离子型化学表面活性剂和采油微生物间存在正向的协同效应,进一步降低化学表面活性剂的临界胶束浓度,增强微生物新陈代谢速率和油水乳化作用^[25-26],其中化学表面活性剂主要通过改变微生物细胞膜通透性来增强微生物的生长代谢^[27]。伊朗石油科技大学证实在十二烷基苯磺酸钠中加入肠杆菌菌液,界面张力进一步降低,界面吸附速率提升了85%,大大缩短了体系达到超低界面张力体系的时间^[28]。

生物表面活性剂是微生物代谢产物的一种,种

类丰富,结构多样,与化学表面活性剂相比,对微生物菌体的毒性更弱^[29],且能适应更广泛的温度、pH值和矿化度。美国、加拿大等国家的学者针对性开发了生物表面活性剂复合微生物驱油技术^[30-31],该技术利用了生物表面活性剂的乳化降黏和生物友好性,提高微生物嗜烃降黏效率,同时利用微生物趋界面性提升生物表面活性剂的作用范围,实现进一步提高采收率的目的。

2.1.2 生物表面活性剂复合化学表面活性剂

生物表面活性剂具有和其他化学类采油体系复配构建高效采油体系的潜力。加入生物表面活性剂可弱化化学表面活性剂极性基团间的空间位阻效应,提高化学表面活性剂界面排布密度,进一步提升复合体系界面活性。有研究表明脂肽与两性甜菜碱、阴离子磺酸盐、阳离子溴化铵等化学表面活性剂均具有良好的协同作用,复配后体系可达到超低界面张力^[32-33]。天津大学研究表明鼠李糖脂与烷基苯磺酸盐在适当比例情况下可得到超低界面张力体系。复合体系在砂岩表面的吸附量减少30%以上,进一步降低了使用成本^[34]。山东大学研究表明生物表面活性剂与化学表面活性剂的协同作用受2种表面活性剂分子结构的影响;当2种表面活性剂间结构互补或彼此不存在界面竞争吸附时,易形成超低界面张力^[35]。华东理工大学、日本国家石油技术研究中心等学者发现微生物与化学表面活性剂复配后可进一步拓宽化学表面活性剂超低界面张力窗口(图1),强化疏水表面水湿性,提高驱油效率^[36-37]。大庆油田开发形成脂肽复合驱油体系,该驱油体系界面活性更高,较常规三元复合驱油体系提高采收率7%以上,成本节约30%^[38]。

2.1.3 生物表面活性剂复合纳米颗粒

纳米颗粒体积小,表面积大,可以进入油藏内小孔隙,但是在油藏内存在聚集和成团的问题,易造成孔隙喉道堵塞^[39]。通常与其他采油体系复合,通过协同作用克服纳米颗粒的局限性。纳米颗粒可以改善传统采油体系的效率,表面活性剂和聚合物可以改善纳米颗粒的稳定性。生物表面活性剂是纳米颗粒最好的携带者和分散剂,两者通过配位协同合作,提升润湿改变、降低界面张力、乳化、流度控制和降黏等采油功能,复合体系在高温高盐条件下仍可保持稳定^[40]。中国科学院的研究也发现生物表面活性剂通过吸附到纳米颗粒上形成稳定纳米颗粒悬浮液,进一步降低界面张力,改变润湿性,提高乳液稳定性^[41]。伊朗巴伯勒理工大学研

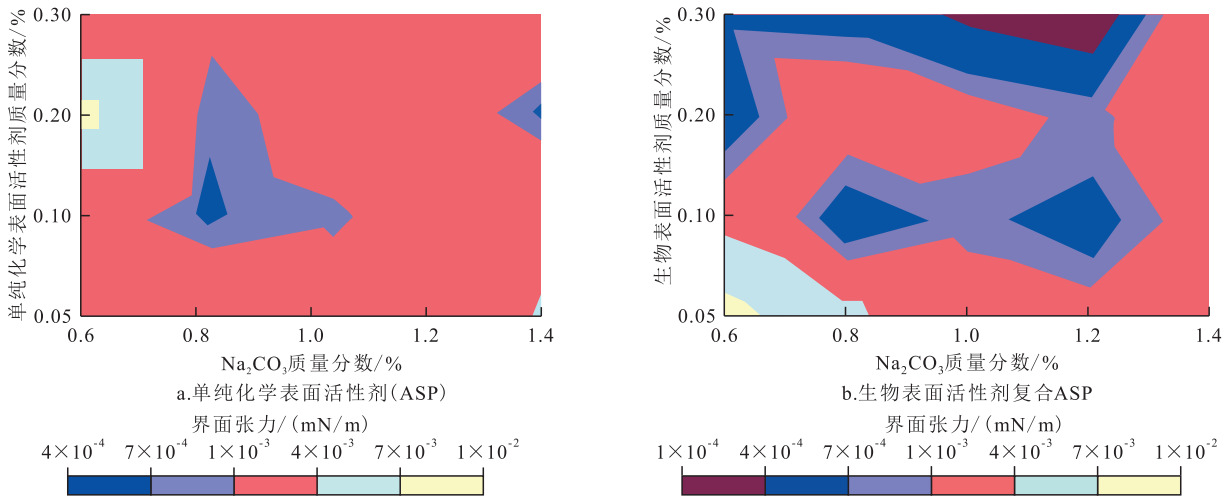


图1 单纯化学表面活性剂(ASP)和生物表面活性剂复合ASP的界面张力^[36]
 Fig.1 Interfacial tension of simple chemical surfactants (ASP) and biosurfactant-ASP^[36]

究发现微生物驱中加入纳米颗粒可提高各部位的剩余油动用程度,与水驱相比,复合体系物理模拟驱油效率提高1倍以上^[42]。

2.1.4 生物酶复合表面活性剂

生物酶是一类依靠细胞工程、基因工程等技术提取的一种基质为蛋白质的生物催化剂,具有专一性、高效的催化作用。采油用生物酶主要用于储层润湿改性、降压增注、解堵增产等方面^[43]。西北农林大学2014年开展了一系列真菌(*Aspergillus spp.*)胞外酶降解原油的提高采收率应用潜力评价研究,该类生物酶的原油降黏率达到59.0%,具有一定的采油应用潜力^[44-45]。东北石油大学将生物酶制剂和表面活性剂进行复合,通过2种体系的协同作用达到超低界面张力为 7.5×10^{-3} mN/m,同时复合体系还具有良好的润湿改性、乳化及洗油性能^[46]。

2.2 扩大波及体积方面

2.2.1 菌体复合聚合物调剖

大部分老油田长期注水采油导致油藏内层间、层内及平面水相渗透率差异变大,动态非均质性加剧,如何有效扩大波及体积是该类油藏提高采收率的关键,研究最多的就是利用聚合物选择性封堵高渗透区,改善吸水剖面^[47]。聚合物封堵和微生物采油技术的复合可以有效扩大微生物体系波及范围,提高技术的实施效果。2018年西安石油大学开展了聚合物-微生物复合驱的室内模拟和现场试验,从宝利格油田筛选到一株内源菌株HB3,并筛选与HB3兼容的HPAM/Cr(III)交联封堵体系。室内非均质岩心中低渗透区采收率从12.8%提高到47.5%,高渗透区采收率从47.1%提升到63.2%。后续注入微生物菌液段塞后,低渗透区的采收率从

49.5%提升到70%,高渗透区从67.5%提升到78% (图2)^[48]。中国科学院的研究也证实微生物与凝胶复合后不会对弱凝胶的成胶性或微生物自身的乳化降黏性能造成影响,复合体系可发挥两者协同作用,进一步提高采收率^[49]。西南大学将2种菌液混合后与聚合物复配,复合后对聚合物黏度及菌浓的影响较小,该复合体系适用于低渗透裂缝-基质油藏,相较聚合物驱/微生物驱,提高采收率达到10%以上。

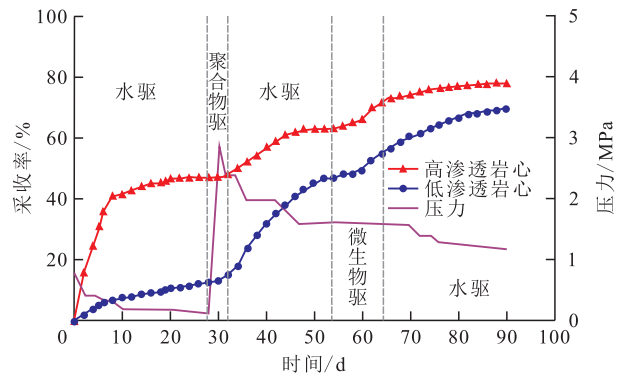


图2 聚合物-微生物复合驱室内双管物理模拟驱替结果^[48]
 Fig.2 Laboratory physical simulation of polymer-microbial flooding by twin-tube^[48]

2.2.2 反硝化菌复合聚合物

聚合物驱是最有效的提高采收率技术,体系黏度是该技术成功的关键,由于油田开发系统水体中硫酸盐还原菌(SRB)的破坏作用,聚合物的井口黏度大幅降低,而长期使用传统杀菌剂会产生耐药性,杀菌效果变差,无法保证聚合物驱效果。胜利油田针对该问题,研发了反硝化菌脱硫保黏复合聚合物驱技术,通过反硝化菌竞争SRB的营养底物,氧化SRB产生的硫化物,除去污水中原有硫化物的同时有效降低SRB的活性(图3)^[50-51]。该项技术安

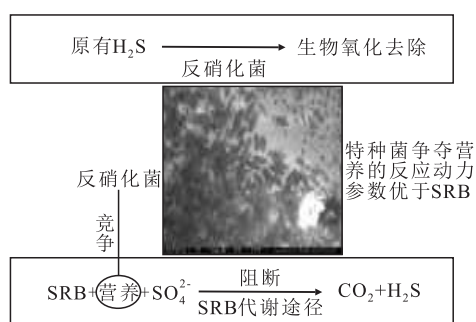


图3 反硝化菌抑制硫酸盐还原菌原理

Fig.3 Principle of denitrifying bacteria inhibiting sulfate-reducing bacteria

全、环保,成本低,投加工工艺简单,从根本上解决了由硫化物导致的聚合物溶液黏度降低问题,保障了胜利油田聚合物驱实施效果。

2.2.3 生物多糖复合化学表面活性剂

生物多糖(EPS)因其生物相容性、生物降解性、无毒性和结构变异性而越来越受到关注^[52]。生物多糖和化学表面活性剂的复合可以同时提高驱替液黏度并降低油水界面张力,通过增加毛管数、降低流度比和提高波及效率来提高采收率。中外相关机构也开展了一些生物多糖和化学表面活性剂间的相互作用研究,结果表明黄原胶与表面活性剂复合后产生分子间疏水作用及静电作用,改变黄原胶分子链的构象^[53]。2022年伊朗萨基姆萨布泽瓦里大学开展了植物基皂苷类表面活性剂和黄原胶复合后的采油性能评价,植物基皂苷类表面活性剂具有低聚糖结构,可以耐受120℃高温,将其和黄原胶复合后,增加了溶液液滴间的内聚力^[54]。

2.2.4 生物多糖复合纳米颗粒

纳米颗粒复合聚合物也称为聚合纳米流体,近几年备受关注。与单纯聚合物相比,聚合物和SiO₂等纳米颗粒的复合体系展现了更好的流变性能和温度耐受性^[55-59],2020年ALIABADIAN等证实聚合纳米流体与HPAM相比,提高采收率7.8%^[60]。2019年CORREDOR等研究了Fe(OH)₃、SiO₂纳米颗粒辅助黄原胶的流变学和驱油效果,复合后体系黏度增加,采收率分别提高2%和3%^[61]。2020年BERA等报道了添加纳米颗粒改善瓜尔胶聚合物的流变学和驱油性能^[62]。2021年KEYKHOSRAVI等研究了TiO₂纳米颗粒复合黄原胶后提高采收率达到25%^[63]。2022年GBADAMOSI等开展了金属氧化物和非金属氧化物2大类3种不同类型纳米颗粒与黄原胶复合后在地层盐水条件下的流变及提高采收率性能。生物聚合物与纳米分子间形成键合,增强其流变性;纳米颗粒的屏蔽效应提升了聚合物的

耐盐性,同时纳米颗粒在界面吸附后也降低了复合体系的油水界面张力,提高采收率均达到25%以上^[64]。

2.2.5 生物多糖复合聚合物

2022年中国石油大学(华东)分析了一种新型鞘氨糖与聚丙烯酰胺复合后的黏度和流变性能,生物多糖和聚丙烯酰胺混合比例为9:1时复合体系的黏度最高,具有协同增稠的效果。随着生物多糖比例的增加,体系的弹性模量大于黏性模量,说明分子间相互作用逐渐形成了网络结构,生物多糖分子间氢键、聚合物与生物多糖间氢键强化了交联结构,增加了体系黏度,同时混合后分子间的静电屏蔽效应增强了分子间相互作用,提升了复合体系的耐盐性,也提高了体系的抗盐性。二价阳离子可以作为离子桥,诱导聚合物形成网络结构。结果表明,生物多糖与聚合物结合的方法是拓宽生物多糖在提高采收率领域应用的有效策略^[65]。

2.2.6 生物表面活性剂复合聚合物

生物表面活性剂与聚合物等调剖体系复合时,可以通过分子间作用改变聚合物分子的空间结构,提升体系流变性能。研究发现生物表面活性剂形成混合球形胶束,与聚合物复合后转变为棒状胶束,可进一步强化聚合物缠绕^[66]。英国提赛德大学研究生物表面活性剂-聚合物复合体系在裂缝-基质碳酸盐岩油藏中的应用效果。该体系主要是利用聚合物封堵高渗透裂缝及生物表面活性剂改变润湿来提高采收率^[67]。华东理工大学研究发现相较于常规二元复合体系,生物表面活性剂-聚合物复合体系的乳化效果及稳定性更强,且适用温度更广,在50~90℃仍可达到10⁻³ mN/m。在45℃放置90d后,虽然常规二元复合体系与生物表面活性剂-聚合物复合体系均可达到超低界面张力,但生物表面活性剂-聚合物复合体系的保黏效果更好,聚合物黏度较初始提高了30.5%^[68]。澳大利亚科廷大学研究发现与化学表面活性剂相比,生物表面活性剂对生物聚合物黏度影响更小,生物表面活性剂-生物聚合物复合体系耐温抗盐性能更强,且在高剪切速率下,对生物聚合物黏度损耗更低。但由于生物聚合物自身黏度低于聚合物,因此,注入后仅可封堵15%的高渗透孔隙,生物表面活性剂-生物聚合物复合后提高采收率14%,低于生物表面活性剂-聚合物复合体系^[69]。

2.3 现场应用进展

2.3.1 菌体复合聚合物技术

华北宝力格油田为中孔隙中低渗透储层,储层

宏观非均质性较强,2009年起开展凝胶-微生物复合驱现场试验,共实施790井次吞吐,累计增油量为 26.14×10^4 t。同年又在巴19、巴38断块进行凝胶-微生物复合驱现场试验,对油藏吸水性好、吸水剖面差异大、油井含水高的井先注入可动凝胶,关井使其交联,再注入质量分数为1%的4种复配菌液和质量分数为0.8%的营养。实施后产出液菌浓达到 1×10^6 个/mL以上,原油黏度平均降低48.1%,与水驱开发方案相比增油量为 18.23×10^4 t,平均年递减率降低6.5%,实现了 17.56×10^4 t的3 a稳产,有效改善了非均质油藏的开发效果,形成了具有华北油田特色的凝胶-微生物组合技术序列^[70-71]。

2012年,德国在高温高盐高含水的Bockstedt油田实施微生物-聚合物复合驱现场试验,该油藏温度为80℃,地层水矿化度为 18.6×10^4 mg/L,注入激活剂及生物聚合物,生物聚合物的质量浓度为300 mg/L,剪切速率为 7 s^{-1} 的条件下黏度为25 mPa·s。实施前该油田年产油量仅为峰值年产油量的11%,综合含水率达到95%。2012—2013年底共注入生物聚合物溶液45 000 m³,注入压力在几个月后稳定下来,维持在4.5 MPa,实施后产出液中微生物数量提高2~3个数量级,微生物-聚合物复合体系封堵大孔道,含水率上升趋势减缓,油井产量下降缓慢,较水驱提高采收率25%^[72]。

胜利油田孤岛中二区馆1+2稠油区块水驱高含水薄层稠油油藏,受原油黏度高、地层非均质性强的影响,平面动用不均衡,油井含水差异性明显。2019年12月至2023年开展5注12采井网菌体复合聚合物调剖现场应用,降黏改善油水流动度的同时扩大了生物体系的波及作用范围。三维物理模拟条件下,一次水驱至含水率为95%,单纯微生物驱含水率降低3%左右,注入0.05 PV颗粒型堵剂调剖剂后,注入0.05 PV高温嗜烃乳化菌SL-1(质量分数为10%),三次水驱后含水率大幅降低,从95.9%降至81.3%,井间剩余油有效动用,提高采出程度达12.48%(图4)。现场5口水井实施2轮次颗粒型堵剂调剖,每轮注入80 t,后续连续注入特异性激活剂(质量分数为0.45%)和高温嗜烃乳化菌SL-1(质量分数为0.5%),实施后现场含水率由90.5%降至79.7%,累计增油量为 3.48×10^4 t,阶段采收率为7.5%,方案预测提高采收率9%,生产动态明显改善(图5)。

2.3.2 生物表面活性剂三元复合驱技术

与传统石油磺酸盐弱碱三元体系相比,大庆油

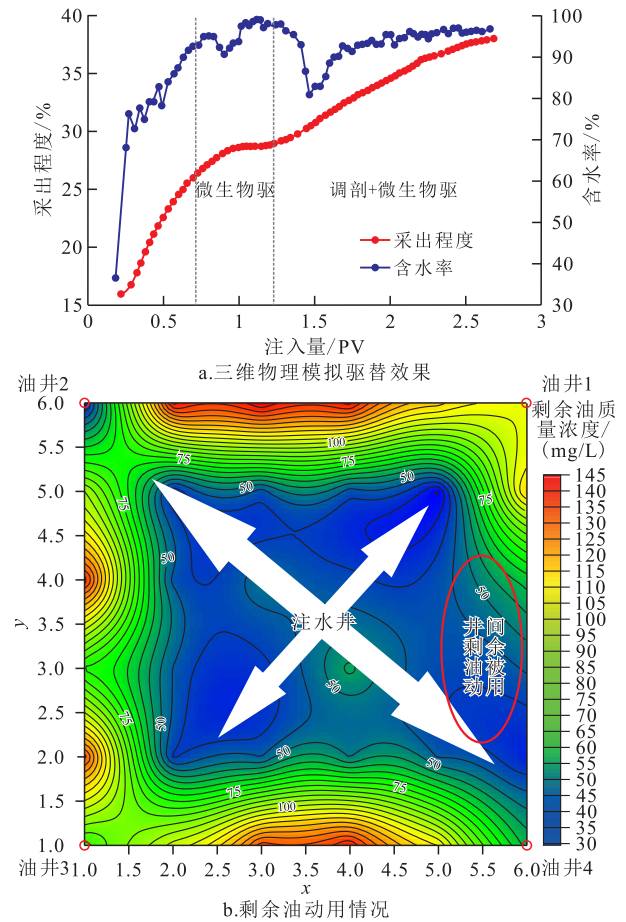


图4 三维物理模拟驱替效果及剩余油动用情况
Fig.4 Three-dimensional physical simulation of displacement effects and residual oil production

田开发形成的脂肽、石油磺酸盐及聚合物三元复合驱油体系在界面性质、抗吸附性、抗稀释性及稳定性方面都表现良好,同时脂肽的加入降低了1/3石油磺酸盐用量,节约了技术成本。2012—2018年在南四东聚合物驱后油藏进行了脂肽三元复合驱先导试验及扩大化试验,试验区实施前综合含水率为95%以上,实施过程中采用前置0.038 PV聚合物段塞(质量浓度为14 000 mg/L),三元主段塞0.2 PV(脂肽为0.1%,石油磺酸盐为0.1%, Na_2CO_3 为1.0%,聚合物为1 800 mg/L),后面注入0.2 PV的聚合物保护段塞,先导区实施后提高采收率22.4%,扩大应用后阶段提高采收率达到16%,节约成本11.3%^[4,73]。该技术的现场应用为生物表面活性剂多元复合驱工业化应用提供了借鉴和技术支撑。

2.3.3 微生物脱硫保黏技术

胜利油田研发的微生物脱硫保黏技术在滨南尚一区外围、孤岛中二北馆5等高含水、低渗透稠油等化学驱油藏开展了现场应用,取得了良好的应用效果。现场实施过程中,首先在注水站内向配聚水中加入1‰菌剂和350 mg/L液体营养剂,待配聚水

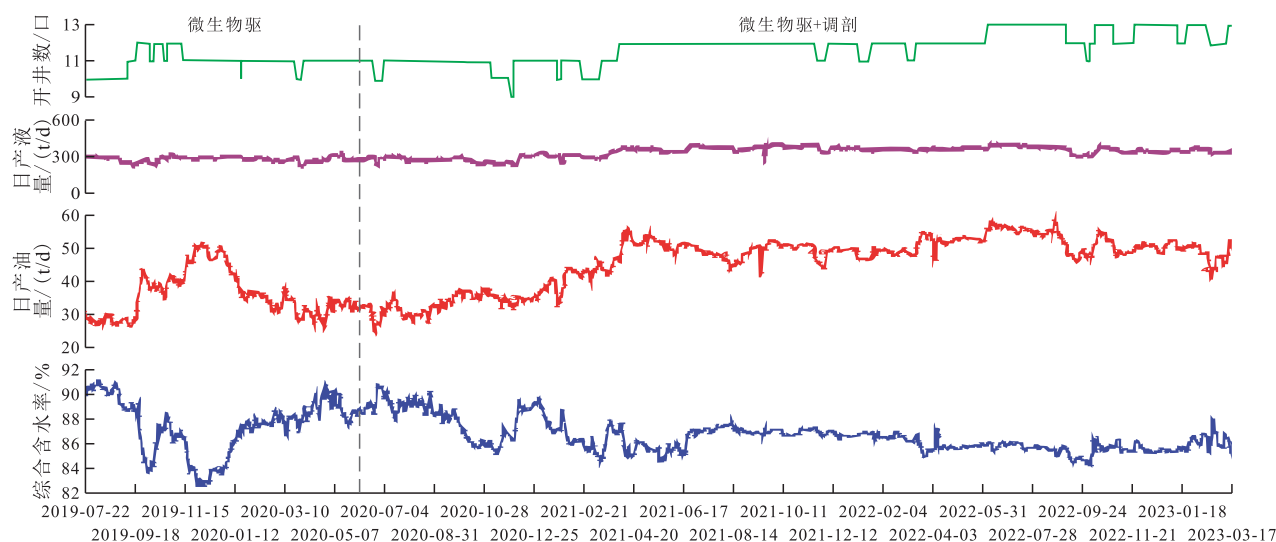


图5 孤岛南区Ng1+2微生物复合驱生产曲线

Fig.5 Production curve of microbial flooding of Ng1 + 2 in southern Gudao Oilfield

中硫化物质量浓度降到0.1 mg/L后,再进行聚合物溶液的配制,后续随聚合物注入向其中连续添加300~500 mg/L的营养剂维持硝酸盐还原菌的生长。尚一区外围馆2-3化学驱10个井组通过添加硝酸盐还原菌,配聚水中 S^{2-} 质量浓度接近于0 mg/L,聚合物现场取样化验黏度维持在60 mPa·s以上。井组受效油井从46%提高至69%,井组日产油量从58 t/d提高至110 t/d,年增油量为 1.5×10^4 t/a以上,提高采收率10.3%,操作成本降低到30美元/bbl以下。

目前,中外生物化学复合提高采收率技术多处于室内研究阶段,现场应用只集中在少数几个油田,主要为微生物、生物表面活性剂复合凝胶或聚合物驱油,通过与凝胶或聚合物等体系的复合,扩大微生物驱油体系的波及范围,应用油藏类型集中在强非均质、高含水油藏,这种复合协同还停留在物质协同水平。硝酸盐还原菌脱硫复合化学驱技术实现了生物和化学的时空协同,通过上游生物改善水质来保障下游化学驱的黏度。部分二元、三元驱油添加的生物表面活性剂也是作为牺牲剂来降低化学表面活性剂的吸附量^[74-75],没有真正实现生物化学在降低界面张力、润湿改性、扩大波及体积等方面的机理协同增效。此外,生物化学复合提高采收率技术现场应用时缺乏差异化的注入工艺及配套工艺研究,无法最大限度的发挥生物和化学各自的提高采收率机理。下一步还需强化室内研究成果的现场转化,通过复合机理指导生物化学复合驱油体系的研发及注入工艺的创新,明确该技术的油藏适应性及技术界限,才能扩大现场应用范围及规模。

3 生物化学复合提高采收率技术发展趋势

油田开发到特高含水期,油藏矛盾更为突出,单一技术无法解决所有矛盾,需要通过不同技术相互补充,协同增效,生物化学复合提高采收率技术在老油田可持续开发领域发挥重要的作用,通过生物化学的协同,可以有效解决油藏物性差及原油高黏造成的注入难、动用难、采出难的问题。目前该技术还处于起步阶段,多为微生物与化学体系的体系协同,室内研究不深入,油藏适应范围不明确,现场应用规模小。生物化学复合提高采收率技术需要结合具体油藏情况,在油藏不同位点、不同开发阶段发挥各自技术的优势,通过机理协同及时空协同实现油藏立体开发(图6)。下一步需从以下5个方面开展深入的研究:

(1)需要加大微生物采油菌株及化学驱油体系的研发,提升菌株及化学驱油剂的降黏、储层改性、降低界面张力及扩大波及体积的性能。

(2)明确微生物及化学采油体系的性能优势及短板,建立不同体系的油藏适应界限范围,为复合技术体系、工艺设计及方案编制提供支撑。

(3)深化微生物菌体、生物制剂等技术体系协同增效分子机制研究,为后期构建生物化学多元复合高效技术体系研发提供理论支撑。

(4)需加大生物菌株、生物采油驱油制剂及化学采油制剂工业化生产方面的研究,通过原料、工艺优化,降低生产成本,满足油田工业化应用的

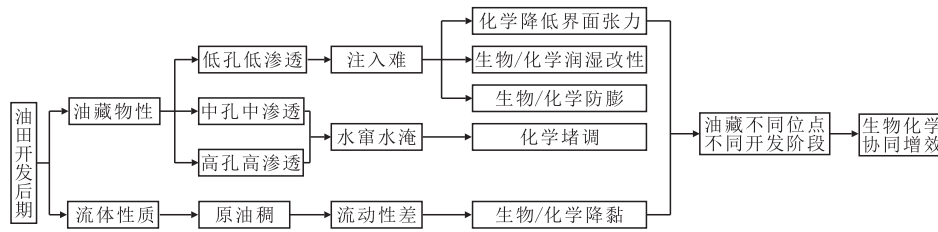


图6 生物化学复合提高采收率技术研究应用趋势

Fig.6 Research and application trend of biochemical composite enhanced oil recovery technology

需求。

(5)需要创新研发生物化学复合提高采收率技术体系现场注入工艺及开发方案,根据不同体系特性设计个性化注入工艺,根据油藏层系间差异设计体系及工艺组合方式,形成生物化学复合开发方案,实现油藏不同阶段、不同层系的立体高效开发。

4 结论

化学采油技术适应原油黏度范围广、降黏效率高、聚合物类驱油剂流变性能好,可调整宏观非均质性,但后期增油效果变差后接替开发难度大;微生物采油具有趋向性,且生物采油制剂发酵成本低,耐温耐盐性好,但是降黏效率低,无法有效调控强非均质性,影响其规模化应用。

目前研究进展表明,生物化学复合提高采收率技术可提高稠油洗油效率,扩大波及体积,现场应用也取得了良好的效果。通过技术攻关及现场实践,实现生物与化学协同加合增效,创新形成变革性的生物化学复合提高采收率技术,实现油藏立体开发,是稠油油藏持续高效开采的重要发展方向。

参考文献

[1] 李辉,庞博,朱法华,等. 碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比[J]. 环境科学, 2022, 43 (11): 5 294-5 304.
 LI Hui, PANG Bo, ZHU Fahua, et al. Comparative energy consumption structure and mode between China and major energy-consuming countries under the background of carbon emission reduction [J]. Environmental Science, 2022, 43 (11): 5 294-5 304.

[2] 饶宏,李立涅,郭晓斌,等. 我国能源技术革命形势及方向分析[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 9-16.
 RAO Hong, LI Licheng, GUO Xiaobin, et al. Study on situation and direction of China energy technology revolution [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(3): 9-16.

[3] YUAN S, WANG Q. New progress and prospect of oilfields development technologies in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 698-711.

[4] 陈金凤. 脂肽复配弱碱三元复合驱油体系性能及试验效果[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(5):91-97.
 CHEN Jinfeng. ASP flooding system with lipopeptide compound weak alkali and its test effect [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(5): 91-97.

[5] 隋伟鹏. 低效稠油冷采技术探索与应用[J]. 内蒙古石油化工, 2024, 50(2):87-90.
 SUI Weipeng. Exploration and application of the cold recovery technology for low efficiency heavy oil [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2024, 50(2): 87-90.

[6] 边紫薇. 我国稠油油田微生物采油进展综述[J]. 石油地质与工程, 2021, 35(3):73-79.
 BIAN Ziwei. Progress review of microbial enhanced oil recovery in heavy oil fields in China [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2021, 35(3): 73-79.

[7] GBADAMOSI A, PATIL S, KAMAL M S, et al. Application of polymers for chemical enhanced oil recovery: a review [J]. Polymers, 2022, 14(7): 1 433.

[8] GBADAMOSI A O, JUNIN R, MANAN M A, et al. An overview of chemical enhanced oil recovery: recent advances and prospects [J]. International Nano Letters, 2019, 9: 171-202.

[9] 廖广志,王强,王红庄,等. 化学驱开发现状与前景展望[J]. 石油学报, 2017, 38 (2):196-207.
 LIAO Guangzhi, WANG Qiang, WANG Hongzhuang, et al. Chemical flooding development status and prospect [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38 (2): 196-207.

[10] 束青林,郑万刚,张仲平,等. 低效热采/水驱稠油转化学降黏复合驱技术[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(6): 12-21.
 SHU Qinglin, ZHENG Wangang, ZHANG Zhongping, et al. Chemical viscosity reduction compound flooding technology for low-efficiency thermal recovery/water flooding heavy oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(6): 12-21.

[11] 郑万刚,束青林,曹嫣嫄,等. 梳形两亲渗透降黏驱油剂的制备及性能评价[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(3):146-152.
 ZHENG Wangang, SHU Qinglin, CAO Yanbin, et al. Preparation and performance evaluation of comb-shaped amphiphilic permeable agents for viscosity reduction and oil displacement [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29 (3): 146-152.

[12] 计秉玉,孟霖,束青林,等. 稠油化学复合冷采技术研究与应用[J]. 中国工程科学, 2024, 26(1): 216-224.
 JI Bingyu, MENG Lin, SHU Qinglin, et al. Investigation and application of chemical compound flooding for heavy oil [J].

- Strategic Study of CAE, 2024, 26(1): 216-224.
- [13] 魏超平,束青林,吴光焕,等.敏感性普通稠油水驱油藏化学降黏实践[J].特种油气藏,2023,30(2):109-115.
WEI Chaoping, SHU Qinglin, WU Guanghuan, et al. Practice of chemical viscosity reduction in water flooding for sensitive conventional heavy oil reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(2): 109-115.
- [14] 姜雨朦.三次采油化学驱油技术现状与趋势[J].化学工程与装备,2023,(7):213-214.
JIANG Yumeng. Status and trend of chemical flooding technology in tertiary oil production [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2023, (7): 213-214.
- [15] FUJIWARA K, SUGAI Y, ENOMOTO H. Recent advances and prospects in microbial enhanced oil recovery (MEOR): present and future prospects for development of MEOR technology [J]. Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology, 2008, 73(6): 531-540.
- [16] GAO C H. Experiences of microbial enhance oil recovery in Chinese oil fields [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 166: 55-62.
- [17] 束青林,胡婧,林军章,等.“益生菌”提高难采稠油采收率机理与技术实践[J].油气地质与采收率,2022,29(4):76-82.
SHU Qinglin, HU Jing, LIN Junzhang, et al. Mechanism and technical practice of enhancing oil recovery of hard-to-recover heavy oil reservoirs with probiotics [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(4): 76-82.
- [18] 林军章,汪卫东,胡婧,等.胜利油田微生物采油技术研究与应用进展[J].油气地质与采收率,2021,28(2):18-26.
LIN Junzhang, WANG Weidong, HU Jing, et al. Progress in research and application of microbial enhanced oil recovery technology in Shengli Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(2): 18-26.
- [19] 李艳鹏.绿假单胞菌DN1参与石油烃降解基因功能及趋化性研究[D].西安:西北大学,2019.
LI Yanpeng. Gene function and chemotaxis of *Pseudomonas aeruginosa* DN1 involved in petroleum hydrocarbon degradation [D]. Xi'an: Northwest University, 2019.
- [20] 于洋,刘琦,彭勃,等.微生物降解稠油中沥青质的研究进展[J].化工进展,2021,40(3):1574-1585.
YU Yang, LIU Qi, PENG Bo, et al. A review of the biodegradation of asphaltene in heavy oil [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(3): 1574-1585.
- [21] HU F, LIU Y, LI S. Rational strain improvement for surfactin production: enhancing the yield and generating novel structures [J]. Microbial Cell Factories, 2019, 18: 1-13.
- [22] LIN X, ZHENG X, LIU R, et al. Extracellular polymeric substances production by ZL-02 for microbial enhanced oil recovery [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, 60(2): 842-850.
- [23] KE C Y, SUM R, WEI M X, et al. Microbial enhanced oil recovery (MEOR): recent development and future perspectives [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2023: 1-20.
- [24] DUNSMORE B C, BASS C J, LAPPIN-SCOTT H M. A novel approach to investigate biofilm accumulation and bacterial transport in porous matrices [J]. Environmental Microbiology, 2004, 6(2): 183-187.
- [25] 杨风华.二元复合驱体系性能及微观驱油机理研究[J].石油地质与工程,2012,26(1):105-108,111.
YANG Fenghua. Performance analysis of binary compound flooding system and micro-water displacement mechanism research [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2012, 26(1): 105-108,111.
- [26] 李蔚,马挺,李国强,等.微生物与化学剂体系结合提高驱油效率的实验研究[J].南开大学学报:自然科学版,2006,39(6):98-100.
LI Wei, MA Ting, LI Guoqiang, et al. The laboratory study on displacement efficiency with microbial and chemical system [J]. Acta Scientiarum Naturalium University Nankaiensis, 2006, 39(6): 98-100.
- [27] 赖冬敏,郑学成.表面活性剂对采油菌生长的影响[J].四川化工,2023,26(2):10-15,30.
LAI Dongming, ZHENG Xuecheng. The influence of surfactant stress on the growth of oil-producing bacteria [J]. Sichuan Chemical Industry, 2023, 26(2): 10-15, 30.
- [28] HAJIBAGHERI F, HASHEM A, LASHKARBOLOOKI M, et al. Investigating the synergic effects of chemical surfactant (SDBS) and biosurfactant produced by bacterium (*Enterobacter cloacae*) on IFT reduction and wettability alteration during MEOR process [J]. Journal of Molecular Liquids, 2018, 256: 277-285.
- [29] DE OLIVEIRA SCHMIDT V K, DE SOUZA CARVALHO J, DE OLIVEIRA D, et al. Biosurfactant inducers for enhanced production of surfactin and rhamnolipids: an overview [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2021, 37(2): 21.
- [30] GEETHA S J, IBRAHIM M, SANKET J J. Biosurfactants: production and potential applications in microbial enhanced oil recovery (MEOR) [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2018, 14: 23-32.
- [31] HOSSEINI E, REZA T. Experimental investigation of the performance of biosurfactant to wettability alteration and interfacial tension (IFT) reduction in microbial enhanced oil recovery (MEOR) [J]. Petroleum Science and Technology, 2020, 38(3): 147-158.
- [32] 邹爱华,邓雅晴,靳颖,等.十二烷基甜菜碱/脂肽复配体系与原油界面行为的研究[J].油田化学,2012,29(4):464-469.
ZOU Aihua, DENG Yaqing, JIN Ying, et al. Interfacial behavior between dodecyl betaine/lipopeptide aqueous system and crude oil [J]. Oilfield Chemistry, 2012, 29(4): 464-469.
- [33] ALVAREZ V M, GUIMARAES C R, JURELEVICIUS D, et al. Microbial enhanced oil recovery potential of surfactin-producing *Bacillus subtilis* AB2.0 [J]. Fuel, 2020, 272: 117730.
- [34] DAOSHAN L, SHOULIANG L, YI L, et al. The effect of biosurfactant on the interfacial tension and adsorption loss of surfactant in ASP flooding [J]. Colloids and Surfaces A: Physico-

- chemical and Engineering Aspects, 2004, 244(3): 53-60.
- [35] 廖艺, 牛亚宾, 潘艳秋, 等. 复配表面活性剂对油水界面行为和性质影响的模拟研究[J]. 化工学报, 2022, 73(9): 4 003-4 014. LIAO Yi, NIU Yabin, PAN Yanqiu, et al. Modeling the effects of mixed surfactants on the behaviors and properties of the oil-water interface with molecular dynamics [J]. CIESC Journal, 2022, 73(9): 4 003-4 014.
- [36] WANG X, GANG H, LIU J, et al. Consideration of application possibility of biosurfactant and alkaline-surfactant-polymer (B-ASP) with ultra-low crude oil/brine interfacial tension for enhancement of oil recovery [J]. Journal of the Japan Petroleum Institute, 2021, 64(2): 84-91.
- [37] HAJIBAGHERI F, LASHKARBOLOOKI M, AYATOLLAHI S, et al. The synergic effects of anionic and cationic chemical surfactants, and bacterial solution on wettability alteration of carbonate rock: an experimental investigation [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 513: 422-429.
- [38] 张亚森, 修建龙, 刘卫东, 等. 生物/化学多元复合驱提高采收率技术进展[J]. 应用化工, 2022, 51(3): 846-852. ZHANG Yamiao, XIU Jianlong, LIU Weidong, et al. Progress of EOR technology by bio/chemical multiple flooding [J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(3): 846-852.
- [39] YEKEEN N, SALAMPESSY S N, BAKAR A H A, et al. Synthesis and pore-scale visualization studies of enhanced oil recovery mechanisms of rice straw silica nanoparticles [J]. Geoenery Science and Engineering, 2023, 221: 111292.
- [40] WANG D, SUN S, CUI K, et al. Wettability alteration in low-permeability sandstone reservoirs by "SiO₂-Rhamnolipid" nanofluid [J]. Energy & Fuels, 2019, 33(12): 12 170-12 181.
- [41] WANG D, LUO Y J, LAI R, et al. New technique for enhancing oil recovery from low-permeability reservoirs: the synergy of silica nanoparticles and biosurfactant [J]. Energy & Fuels, 2020, 35(1): 318-328.
- [42] KEYKHOSRAVI A, VANANI M B, AGHAYARI C. TiO₂ nanoparticle-induced Xanthan Gum polymer for EOR: assessing the underlying mechanisms in oil-wet carbonates [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 204: 108756.
- [43] 才艳华. 低渗透油田生物酶降增压注技术[J]. 中外能源, 2010, 15(8): 47-51. CAI Yanhua. Technique of pressure decreasing and injection increasing by biological enzyme in the low permeability oilfield [J]. Sino-Global Energy, 2010, 15(8): 47-51.
- [44] GAO H, LAI H, ZHANG J, et al. Effects of bacterial cell density and alternating microbial-and enzymolysis-enhanced oil recovery on oil displacement efficiency [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 327: 28-38.
- [45] ZHANG J H, XUE Q H, GAO H, et al. Degradation of crude oil by fungal enzyme preparations from *Aspergillus* spp. for potential use in enhanced oil recovery [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2015, 91(4): 865-875.
- [46] 李天民. 生物酶与表面活性剂复合驱油体系研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2024. LI Tianmin. A Study on the combination flooding system of bio-enzyme and surfactant [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2024.
- [47] EVANS D B, STEPP A K, 韩培慧, 等. 微生物-三元复合驱提高采收率技术的探讨 [J]. 国外油田工程, 1999, 15(5): 5-7. EVANS D B, STEPP A K, HAN Peihui, et al. Exploration of enhanced oil recovery techniques by microbe-ternary compound flooding [J]. Foreign Oil Field Engineering, 1999, 15(5): 5-7.
- [48] KE C Y, SUM W J, LI Y B, et al. Polymer-assisted microbial-enhanced oil recovery [J]. Energy & Fuels, 2018, 32(5): 5 885-5 892.
- [49] 齐义彬, 曹美娜, 黄立信, 等. 微生物与弱凝胶复合驱油配伍性 [J]. 石油学报, 2015, 36(4): 490-495. QI Yibin, CAO Meina, HUANG Lixin, et al. Compatibility of microbe-weak gel combinational flooding [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(4): 490-495.
- [50] 郭省学, 徐闯, 徐鹏, 等. 孤岛油田污水生物脱硫保黏技术应用 [J]. 现代化工, 2018, 38(1): 180-182. GUO Xingxue, XU Chuang, XU Peng, et al. Application of biological desulfurization and viscosity retention technology for wastewater in Gudao Oilfield [J]. Modern Chemical Industry, 2018, 38(1): 180-182.
- [51] HITZMAN D, DENNIS M, HITZMAN D. Recent successes: MEOR using synergistic H₂S prevention and increased oil recovery systems [C]//SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, 2004.
- [52] DE SOUZA E R, RODRIGUES P D, SAMPAIO I C F, et al. Xanthan gum produced by *Xanthomonas campestris* using produced water and crude glycerin as an environmentally friendlier agent to enhance oil recovery [J]. Fuel, 2022, 310(2): 122421.
- [53] GANSBILLER M, SCHMID J, SIEBER V. Rheology of sphingans in EPS-surfactant systems [J]. Carbohydrate Polymer, 2020, 248: 116778.
- [54] NAVAIE F, EHSAN E, HYOUNG C. Xanthan gum-added natural surfactant solution of Chuback: A green and clean technique for enhanced oil recovery [J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 354: 118909.
- [55] MAURYA N K, MANDAL A. Studies on behavior of suspension of silica nanoparticle in aqueous polyacrylamide solution for application in enhanced oil recovery [J]. Petroleum Science & Technology, 2016, 34(5): 429-436.
- [56] HU Z, HARUNA M, GAO H, et al. Rheological properties of partially hydrolyzed polyacrylamide seeded with nanoparticles [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017, 56(12): 3 456-3 463.
- [57] GBADAMOSI A, RADZUAN J, MANAN M, et al. Nanotechnology application in chemical enhanced oil recovery: current opinion and recent advances [M]. Norderstedt, Germany: Current Opinion and Recent Advances, 2019.
- [58] GBADAMOSI A O, JUNIN R, MANAN M A, et al. Effect of aluminum oxide nanoparticles on oilfield polyacrylamide: rheology, interfacial tension, wettability and oil displacement studies [J]. Journal of Molecular Liquids, 2019, 296: 111863.

- [59] HARUNA M A, PERVAIZ S, HU Z, et al. Improved rheology and high-temperature stability of hydrolyzed polyacrylamide using graphene oxide nanosheet [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(22): 47582.
- [60] ALIABADIAN E, SADEGHI S, MOGHADDAM A R, et al. Application of graphene oxide nanosheets and HPAM aqueous dispersion for improving heavy oil recovery: effect of localized functionalization [J]. *Fuel*, 2020, 265: 1-11.
- [61] CORREDOR L M, HUSEIN M M, MAINI B B. Effect of hydrophobic and hydrophilic metal oxide nanoparticles on the performance of xanthan gum solutions for heavy oil recovery [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(1): 94.
- [62] BERA A, SHAH S, SHAH M, et al. Mechanistic study on silica nanoparticles-assisted guar gum polymer flooding for enhanced oil recovery in sandstone reservoirs [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 598: 124833.
- [63] KEYKHOSRAVI A, VANANI M B, AGHAYARI C. TiO₂ nanoparticle induced Xanthan Gum polymer for EOR: assessing the underlying mechanisms in oil-wet carbonates [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 204: 108756.
- [64] GBADAMOSI A O, YUSUFF A, AGI A, et al. Mechanistic study of nanoparticles-assisted xanthan gum polymer flooding for enhanced oil recovery: a comparative study [J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2021, 12: 207-213.
- [65] JI S, WEI F, LI B, et al. Synergistic effects of microbial polysaccharide mixing with polymer and nonionic surfactant on rheological behavior and enhanced oil recovery [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 208: 109746.
- [66] 肖婧文. 微生物脂肽复配体系性质研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
XIAO Jingwen. Properties research of the biosurfactant lipopeptide complex system [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.
- [67] KAMAL E G, DAVID H, MEEZ I, et al. Application of water-soluble polymer/biopolymer combined with a biosurfactant in oil-wet fractured carbonate reservoirs [J]. *ACS Omega*, 2021, 6(24): 15 674-15 685.
- [68] GE M, MIAO S, LIU J F, et al. Laboratory studies on a novel salt-tolerant and alkali-free flooding system composed of a biopolymer and a bio-based surfactant for oil recovery [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 196: 107736.
- [69] MACHALE J, MAJUMDER S K, GHOSH P, et al. Development of a novel biosurfactant for enhanced oil recovery and its influence on the rheological properties of polymer [J]. *Fuel*, 2019, 257: 116067.
- [70] 王志强, 崔延杰, 游靖, 等. 凝胶辅助微生物驱在宝力格油田的现场应用[J]. *长江大学学报: 自科版*, 2014, 11(32): 107-109.
WANG Zhiqing, CUI Yanjie, YOU Jing, et al. Field application of gel-assisted microbiological flooding in the Baolig oilfield [J]. *Journal of Yangtze University: Natural Science Edition*, 2014, 11(32): 107-109.
- [71] 任付平, 郑雅, 裴亚托, 等. 宝力格油田巴19断块微生物-凝胶组合驱技术研究[J]. *长江大学学报: 自科版*, 2016, 13(1): 21-24.
REN Fupin, ZHENG Ya, PEI Yatuo, et al. Research and application of microbial gel combination flooding in block Ba 19 of Baolige oilfield [J]. *Journal of Yangtze University: Natural Science Edition*, 2016, 13(1): 21-24.
- [72] OGEZI O, STROBEL J, EGBUNIWE D, et al. Operational aspects of a biopolymer flood in a mature oilfield [R]. SPE-12014, 69158.
- [73] 朱慧峰, 王云超, 侯兆伟, 等. 生物三元复配技术及其现场应用[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(2): 100-106.
ZHU Hui Feng, WANG Yunchao, HOU Zhaowei, et al. Biological ASP compounding technique and its field application [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(2): 100-106.
- [74] 李道山, 廖广志, 杨林. 生物表面活性剂作为牺牲剂在三元复合驱中的应用研究[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(2): 106-109.
LI Daoshan, LIAO Guangzhi, YANG Lin. The application studies of bio-surfactant as sacrificial adsorbate in ASP flooding [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(2): 106-109.
- [75] 万璐, 李霜, 黄和, 等. 生物表面活性剂及其复配体系在三次采油中的应用[J]. *生物加工过程*, 2024, 22(3): 39-45.
WAN Lu, LI Shuang, HUANG He, et al. Application of biosurfactant and compound system in tertiary oil recovery [J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2024, 22(3): 39-45.

编辑 刘北羿