

文章编号:1009-9603(2021)02-0018-09

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.02.003

胜利油田微生物采油技术研究与应用进展

林军章^{1,2},汪卫东^{1,2},胡婧^{1,2},吴晓玲^{1,2},谭晓明^{1,2},丁明山^{1,2},曹功泽^{1,2}

(1.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;

2.中国石化微生物采油重点实验室,山东东营257000)

摘要:胜利油田微生物采油技术历经二十多年的室内研究和现场试验,机理研究取得深入认识,技术体系日趋完善,已进入工业化应用阶段。微生物界面趋向性、嗜烃乳化、界面润湿改性等主导驱油机理认识更加深入,并实现了量化表征,为菌种(群)改造和调控指明了方向;建立系统的油藏菌群结构分子生物学分析、采油功能菌激活调控、三维物理模拟驱油等微生物采油技术体系;现场试验从单井吞吐到微生物驱,从外源微生物到内外源微生物共同作用,近几年通过微生物+其它工艺组合的方式大幅提高了该技术油藏适应性。目前已进入全面先导实验向工业化应用的转化阶段。截至2019年12月胜利油田微生物驱油已实施10个区块,累积增油量为 30×10^4 t。微生物驱技术在沾3普通水驱稠油油藏现场试验取得成功的基础上,又在辛68高温高盐稠油油藏和草13热采低效稠油油藏微生物驱现场试验取得突破。针对不同类型稠油油藏建立了微生物复合气体等复合吞吐工艺,扩大微生物单井吞吐技术应用规模,到2019年12月已实施400余口油井单井吞吐,累积增油量为 8×10^4 t。

关键词:微生物采油;微生物驱;单井吞吐;采油机理;胜利油田

中图分类号:TE357.9

文献标识码:A

Progress in research and application of microbial enhanced oil recovery technology in Shengli Oilfield

LIN Junzhang^{1,2}, WANG Weidong^{1,2}, HU Jing^{1,2}, WU Xiaoling^{1,2},

TAN Xiaoming^{1,2}, DING Mingshan^{1,2}, CAO Gongze^{1,2}

(1. Institute of Petroleum Engineering and Technology, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City,

Shandong Province, 257000, China; 2. Key Laboratory of Microbial Enhanced Oil Recovery,

SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

Abstract: More than 20 years of laboratory experiments and field trials have yielded in-depth understanding of the mechanism and a comprehensive system for the microbial enhanced oil recovery (MEOR) technology in Shengli Oilfield, and the technology has been applied to industrial production. The dominant EOR mechanisms, such as microbial interface tropism, hydrocarbon-philic emulsification, and interface wetting modification have been studied thoroughly and characterized quantitatively, pointing out a direction for the transformation and regulation of bacterial species (groups). We have established a MEOR system integrating molecular biological analysis of flora structure in reservoirs, activation and regulation of functional bacteria for oil production, and three-dimensional physical simulation of oil displacement. The MEOR field trials develop from single well huff-n-puff to microbial flooding and from the single investigation of exogenous microorganisms to the comprehensive study of both endogenous and exogenous microorganisms. In recent years, the adaptability of this technology in reservoirs has been greatly improved through the combination of MEOR and other EOR technologies. At the moment, it has embarked on transformation from pilot tests to industrial applications. As of December 2019, MEOR was applied to the 10 zones in Shengli Oilfield, with a cumulative oil increase of 30×10^4 t. Besides the effective MEOR field trials in heavy oil reservoirs of Block Zhan3 which was used to be exploited by conventional water-flooding, the MEOR have been made breakthroughs in a high-temperature and high-salinity heavy oil reservoir of Block Xin68 and a heavy oil reser-

收稿日期:2020-08-26。

作者简介:林军章(1979—),男,辽宁大连人,高级工程师,博士,从事石油微生物学方面的研究。E-mail:linjunzhang.slyt@sinopec.com。

voir subject to inefficient thermal recovery of Block Cao13. For different types of heavy oil reservoirs, complex huff-n-puff technologies, such as those for microbial compound gas, have been developed, enabling a wider application of microbial single well huff-n-puff technology. As of December 2019, MEOR technology had been applied in more than 400 oil wells with single well huff-n-puff, with a cumulative oil increase of 8×10^4 t.

Key words: MEOR; microbial flooding; single well huff-n-puff; oil recovery mechanism; Shengli Oilfield

微生物采油是通过向地层中注入营养液(激活剂)或微生物,利用油藏条件下微生物的生长代谢活动,增加原油产量,提高采收率的技术^[1-3]。该技术有效期长,施工成本较低,投入产出高,工艺简单,使用的注剂可生物降解,对地层无伤害,对环境无污染,是典型的绿色环保型技术^[4]。中国适合微生物采油的地质储量约为 68×10^8 t,按提高采收率3%计算,可增加可采储量 2×10^8 t,经济和社会效益显著,具有重要的科学研究价值和现实应用意义。随着生物技术的快速发展,对油藏微生物的开发利用能力日益增强,微生物采油技术必将为石油工业的发展做出重要贡献。胜利油田从1995年正式开始微生物采油技术的研发,1998年进入现场试验,历经二十多年的室内研究和现场试验,从微生物单井吞吐到微生物区块驱油,从外源微生物驱到内外源微生物复合驱,发展至今通过微生物+其它工艺组合的方式大幅提高了该技术的油藏适应性,目前已进入全面先导试验向工业化应用的转化阶段^[5-6]。近五年来,胜利油田在微生物界面趋向性、微生物嗜烃乳化、界面生物润湿性等机理方面取得系统深入的认识,在油藏菌群分析、采油功能菌激活与调控、微生物驱物理模拟等技术体系建设方面均取得较大进展^[7-9]。截至2019年12月胜利油田微生物驱油已实施10个区块,其中,罗801块属于普通水驱稠油油藏,已实施微生物驱19年,是目前报道的实施时间最长的区块,累积增油量为 16.36×10^4 t,阶段提高采收率为6.03%^[5];辛68块属深层水驱稠油油藏,油藏温度为93℃,地层水矿化度超过60 000 mg/L,现场试验取得突破,2016年8月开始实施微生物驱后,区块综合含水率从91%下降至83%,产量从9 t/d上升到16 t/d^[10]。近几年,针对低产低效稠油油井开展微生物单井吞吐技术增产提效,到2019年12月已实施400余口油井,累积增油量达 8×10^4 t,获得显著经济效益,为稠油转换开发方式探索了新的技术路径^[11]。

1 微生物采油机理研究进展

1.1 微生物界面趋向性

具有采油功能的细菌在油藏中能够主动向原

油方向运动,在油水界面原位生长、繁殖和代谢,实现与原油的高效作用。研究和调控微生物在油水界面的趋向性,对于提高微生物与原油作用效率至关重要^[12-13]。前期利用微观模型定性研究了微观尺度下微生物具有油水界面趋向性^[14],近期开展了宏观尺度(1 m)下微生物在流体及多孔介质体系中的界面趋向性研究。在缺乏其它营养的流体或多孔介质环境中,观察到明显的菌体向油砂部位富集的现象,流体及多孔介质中菌体的运移速度为18~23 cm/d,空白无油砂体系中相同菌体的运移速度仅为7~9 cm/d(图1)。

1.2 微生物原位乳化原油

微生物乳化是其核心驱油机理,中高温油藏乳化功能菌以地衣芽孢杆菌为主,代谢产物为大分子多糖蛋白类乳化剂,不同于中低温油藏微生物产生的小分子鼠李糖脂、脂肽等生物表面活性剂。前期研究主要集中在好氧条件下微生物乳化功能,但油藏作为厌氧环境,好氧生物乳化在油藏内难以大范围长时间实现。胜利油田建立了以电子受体为核心的厌氧激活剂体系,实现了厌氧条件下微生物对原油乳化功能,进一步强化了油藏条件下微生物乳化作用^[15]。

1.3 微生物嗜烃降黏机制

进一步明确了微生物嗜烃降黏机制,微生物降解后胶质、沥青质芳碳率和结构单元数显著降低,表明微生物通过降解胶质和沥青质中的多环芳烃,降低H=H分子间和芳香环系的键能,减弱结构单元的缔合力,降低原油黏度,提高原油流动性^[16]。同时,微生物可以脱除胶质、沥青质结构中的氮和硫元素,氮和硫作为原油中的杂原子在胶质、沥青质网状结构中起交联作用,使分子之间连接更加紧密,导致原油黏度大幅上升,微生物通过脱出氮和硫元素破坏胶质、沥青质的网状结构,降低原油黏度,氮和硫元素的脱出率达到20%~30%。

1.4 微生物改变界面润湿性机制

微生物改变界面润湿性是微生物采油的重要机理之一,在宏观层面表现为将亲油性岩石表面反转为中性或亲水,提高原油渗流能力。微生物作用改变润湿性有2个方面:其一,微生物自身的作用,

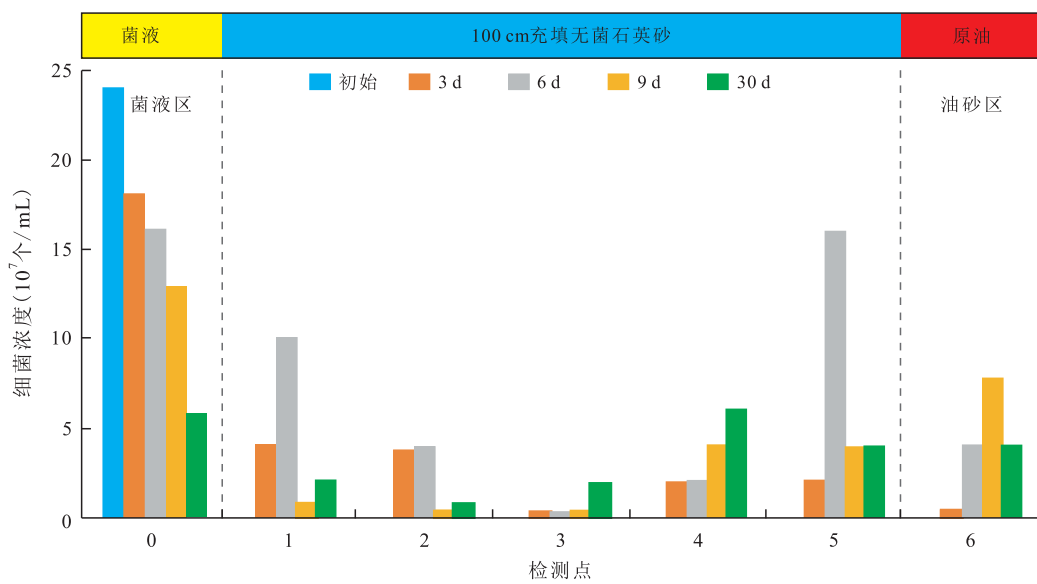


图1 多孔介质中微生物向油水界面主动运移实验模型及实验结果

Fig.1 Experimental model and results of active migration of microorganisms to water-oil interface in porous media

利用微生物的界面趋向性,在岩石表面吸附形成生物膜,改变岩石表面的润湿性^[17];其二,微生物代谢产物的作用,主要是生物表面活性剂,包括鼠李糖脂、脂肽和槐糖脂等,在岩石表面吸附润湿剥离原油,降低原油黏附功,提高油相渗流能力^[18](表1)。

表1 生物表面活性剂处理对原油与基底间界面黏附功的影响

Table1 Effect of biosurfactant on adhesion work between crude oil and substrates

名称	界面张力(mN/m)	接触角(°)	黏附功(mN/m)
空白	30.2	58.3	14.2
鼠李糖脂	0.68	25.7	0.069
槐糖脂	3.24	47.1	1.03
脂肽	0.37	17.4	0.016

2 微生物采油技术研究进展

2.1 油藏菌群分子生物学分析技术

油藏极端环境存在种类丰富、类型特殊、代谢复杂的微生物群落,是微生物采油技术的物质基础,准确解析群落组成及其功能是开展微生物采油技术的前提。传统培养法只能解析其中1%的微生物种类,分子生物学技术的发展极大地推动了油藏微生物群落研究领域的发展,使准确而系统的解析油藏环境微生物信息成为可能。胜利油田基于荧光定量PCR技术,建立了5种驱油功能菌的定量检测技术,检测下限达到10个/mL,标准曲线相关系数达到0.99,实现产脂肽菌、产乳化剂菌、嗜烃菌、产甲烷古菌、硝酸盐还原菌及硫酸盐还原菌的快速准确

定量^[19];同时利用高通量测序及宏基因组学技术建立了油藏微生物群落组成及功能解析技术,对油藏样品群落的覆盖度达到95%以上^[8]。

2.2 采油功能菌群高效激活技术

激活剂是目前微生物采油技术中调控微生物群落的主要手段。激活剂的发展伴随着微生物采油技术的发展,随着胜利油田开发难度的日益增大,对激活剂性能的需求越来越多,激活剂的研发已经从“单一功能菌系选择性激活”向“功能菌群时空调控”,从“简单、快速营养组分”向“复杂、长效营养组分”方向发展,逐步研发出驱油功能菌高效选择性激活剂、油藏深部延迟激活剂、流度控制稠化型激活剂等(图2),实现不同类型驱油功能菌在驱

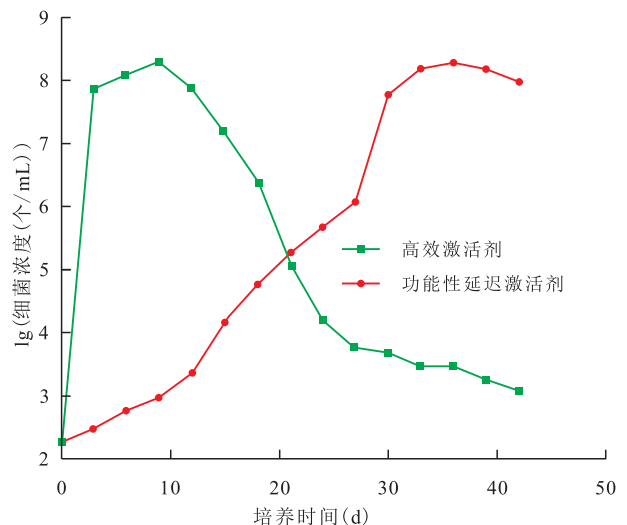


图2 高效与功能性延迟激活剂的激活时效

Fig.2 Activation time of high-efficiency and functional activators

油不同阶段、不同类型油藏内精准地激活和调控^[20]。

2.3 微生物驱物理模拟技术

微生物驱物理模拟技术是微生物室内研究衔接现场试验的重要环节,胜利油田已经形成完善的微生物驱物理模拟体系,包括微观可视模型^[14]、一维长岩心管式模型^[21]、二维平板模型、三维非均质模型^[22]4种不同功能和特点的物理模拟手段(表2),近期建立微生物驱三维物理模拟技术,核心是形成微生物驱相似准则,深化了微生物对油藏非均质适应性认识,指导微生物驱油工艺优化。

表2 不同微生物驱模拟功能特点
Table2 Functions of MEOR physical simulation models

微生物驱物理模型	规格	功能特点
微观可视模型	芯片尺寸 耐温 120 ℃ 耐压 15 MPa	微生物采油 微观机制研究
一维长岩心管式模型	尺寸:50 mm×7 600 mm 耐温 150 ℃ 耐压 20 MPa	菌体运移、演替、驱油效率评价,满足微生物生长代谢周期需求
二维平板模型	尺寸:300 mm×300 mm×30 mm 耐温 150 ℃ 耐压 8 MPa	平面非均质适应性研究,实验周期短
三维非均质模型	尺寸:800 mm×800 mm×50 mm 耐温 150 ℃ 耐压 5 MPa	层级和平面非均质微生物适应性和配套工艺研究,实验周期长

2.4 微生物驱过程动态调控技术

微生物驱油过程中油藏微生物群落结构存在明显的演替变化规律,对该领域的研究可以深化微生物驱油机理,建立油藏微生物特征与驱油效率间的联系,为微生物驱油现场效果分析及方案调整提供理论依据。胜利油田微生物采油研究中心设计长岩心多轮次连续动态驱替实验模拟现场微生物驱替过程,通过产出液群落特征动态分析揭示了微生物驱替过程中微生物群落存在“好氧起始、兼性过渡、厌氧稳定”的演替变化规律。研究还发现,随着注入轮次的增加,以油藏原始菌群为基础筛选的激活剂对改变后菌群的选择性激活效果逐渐减弱,多样性降幅逐渐缩小,菌浓度峰值逐渐降低,需要在合适的时机开展现场调控以维持高效的选择性激活作用^[23]。在上述研究的基础上进一步确定并量化了可以指示调控时机的关键生物指标,其中选择产甲烷古菌浓度作为油藏微生物群落代谢活性指标,油藏微生物群落多样性变化作为群落稳定性指标,产甲烷古菌浓度较初始油藏提高4个数量级、多样性降幅稳定在30%以下是微生物驱现场最佳调控时期^[24](图3)。利用上述生物关键指标可以实

现现场生产动态的准确预测,提高现场生产动态调控的针对性。

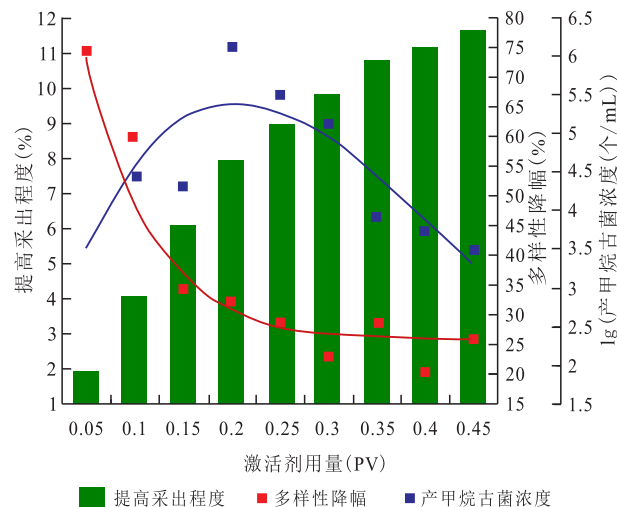


图3 产甲烷古菌浓度多样性降幅与提高采出程度的关系
Fig.3 Relationship between decrease in concentration diversity of methanogenic archaea and EOR

3 现场应用

3.1 微生物驱油

胜利油田从1998年至今先后在10个区块开展了微生物驱油现场试验,截至2019年12月累积增油量为 30×10^4 t,投入产出比平均为1:5.7,目前正在沾3块、辛68块和草13块等区块开展微生物驱油现场试验。

3.1.1 沾3块低效水驱稠油油藏

沾3微生物驱实施区块于1985年投入开发,1989年注水开发,微生物驱油前已进入高含水开发、产量递减阶段,油藏综合含水率为93.8%,采出程度为28.2%,日产油量为24.6 t/d,水驱标定采收率为31.5%,水驱效果差,稳产难度大。

针对沾3块油藏温度和矿化度低^[25],油藏内菌群结构复杂,建立了采油功能菌选择性激活技术,实现乳化和产气菌群高效激活。该区块分3个阶段实施微生物驱,微生物驱后日产油量从29 t/d增加到78 t/d,含水率从93.8%降低到85%,截止到2019年12月,累积增油量达到 7.2×10^4 t,阶段提高采收率为4.09%(图4)。

3.1.2 辛68块高温高盐深层稠油油藏

辛68块油藏埋深为2 205~2 365 m,原始地层温度为89~93 ℃,产出水矿化度为55 920 mg/L,地面原油黏度为3 028~8 761 mPa·s。区块注水开发25 a,目前已进入特高含水开发阶段,油藏综合含水率达

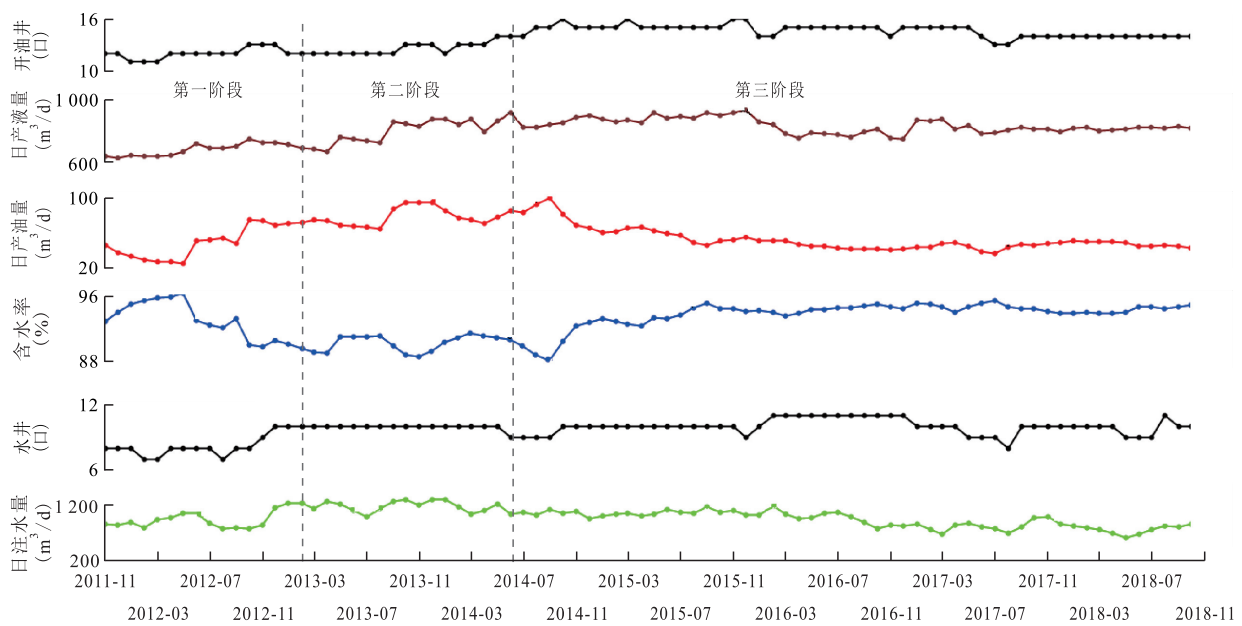


图4 沾3块微生物驱开发曲线

Fig.4 Curves of crude oil production by microbial flooding in Block Zhan3

到95.1%,面临含水率高、采油速度低、采出程度较低、水驱采收率低的开发形势。

针对辛68块油藏温度和矿化度高、功能菌丰度低、微生物代谢速率快、生命周期短的问题,建立了嗜热功能菌长效激活技术。微生物驱实施后明显见效,峰值日产油量增加12.5 t/d,综合含水率最大降幅为14.9%,截止到2019年12月,累积增油量为 1.2×10^4 t,阶段提高采收率为2.98%(图5)。

3.1.3 草13块热采低效稠油油藏

草13块油藏埋深为1 290~1 350 m,油藏温度为60℃,含油面积为4.8 km²,地质储量为 778×10^4 t,地面原油黏度为100~9 000 mPa·s,采出程度为20%,综合含水率为81%,前期热采开发,后转水驱含水率上升快,转微生物驱。微生物试验区为草13

砂四块的2个井组,油井数为12口,水井数为2口。

针对草13砂四块前期热采内源菌群被破坏、后期注水时间短、内源菌种类少,建立嗜烃乳化外源菌强化内源微生物驱技术,实现原油高效降黏。草13砂四块于2019年6月实施微生物驱后累积增油量为2 300 t,日增油量为9.5 t/d,综合含水率下降了5.6%(图6),初步见效,为热采低效稠油转换开发方式探索了新的技术途径。

3.2 微生物单井吞吐

微生物单井吞吐技术是通过向油井注入微生物菌液和激活剂关井培养,利用微生物及其代谢产物的协同作用,提高油井产量。目前针对低产低液、热采低效、边底水等低效稠油井,形成了微生物复合CO₂、微生物复合表面活性剂、微生物复合氮

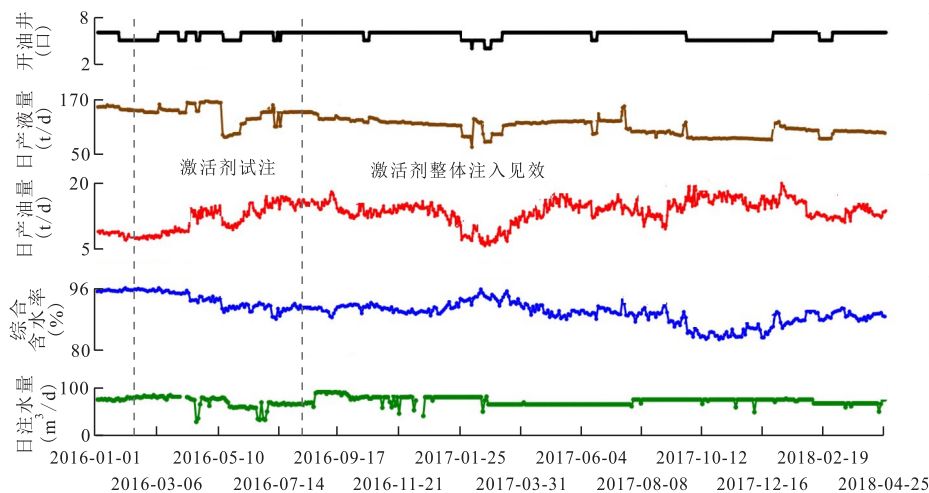


图5 辛68块微生物驱开发曲线

Fig.5 Curves of crude oil production by microbial flooding in Block Xin68

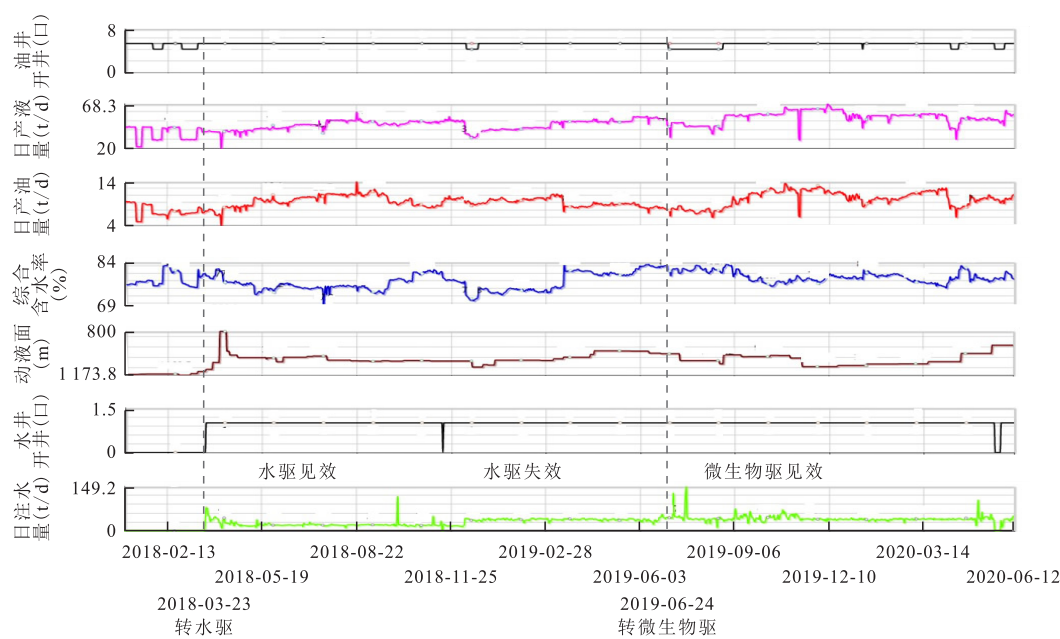


图6 草13块微生物驱开发曲线

Fig.6 Curves of crude oil production by microbial flooding in Block Cao13

气或堵剂等吞吐工艺,解决不同类型油井的生产矛盾。近5 a来,实施微生物稠油吞吐400余井次,有效率为81.4%,累积增油量为 8×10^4 t,平均单井增油量为243 t,投入产出比为1:5(油价按50 \$/bbl)。

3.2.1 低产低液稠油油藏

水驱稠油油藏由于储层渗透率低、原油黏度高、地层能量低,导致部分油井长期低产低液生产,针对该类油井建立微生物复合CO₂吞吐工艺,利用微生物改变储层润湿性、降黏,提高原油渗流能力,同时通过CO₂复合提高单井产量。近5 a共实施63口井,有效率达到90.5%,累积增油量为 2.07×10^4 t。

滨南单14区块属于典型的低效水驱稠油油藏,采用微生物复合CO₂吞吐实施13口井,累积增油量为 1.2×10^4 t(图7)。其中SJS14X60井属于典型的低产低液稠油井,由于渗透率低、原油黏度较高、矿化度高、泥质含量高、原油流动阻力大,一直低液生产。2018年实施第一轮微生物吞吐,日产量由0.5 t/d提高到7 t/d,2019年3月二次吞吐再次提高产能,累积增油量为1 240 t(图8)。

3.2.2 热采多轮次稠油油藏

针对热采多轮次低效稠油油藏,形成微生物复合生物表面活性剂吞吐体系,该体系有较强的降黏

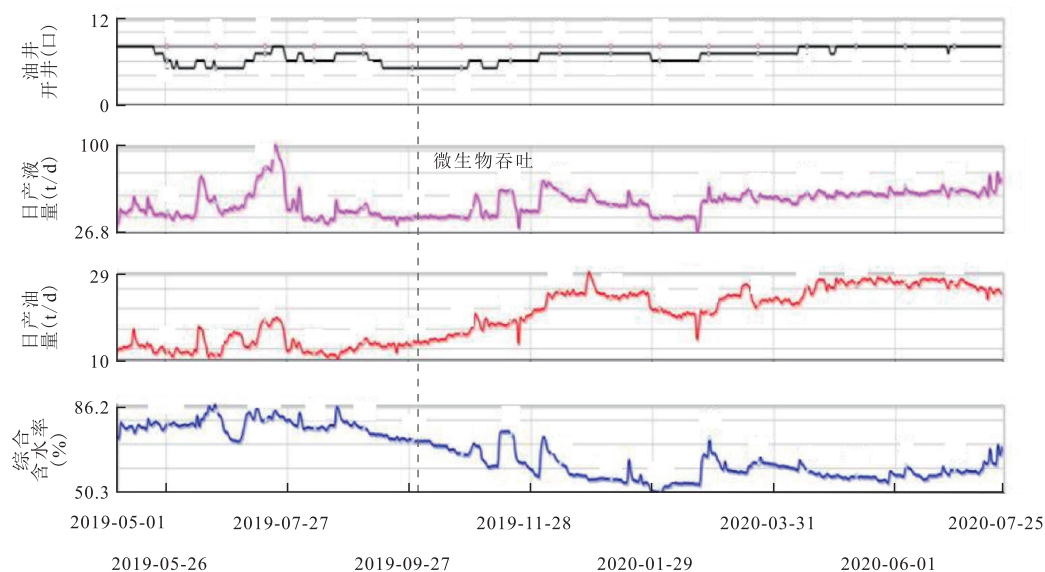


图7 滨南单14区块微生物吞吐井整体实施情况

Fig.7 Overall crude oil production by microbial huff-n-puff in Block Shan14

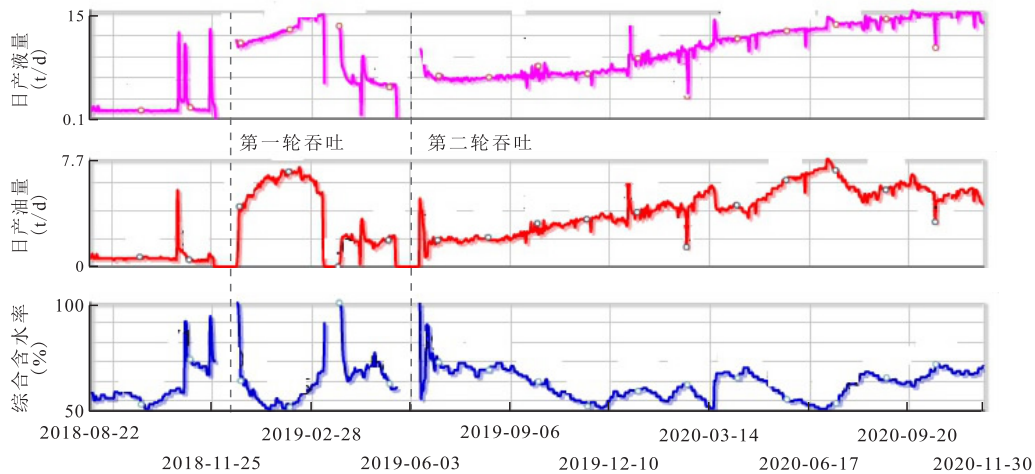


图8 SJS14X60井微生物吞吐生产曲线

Fig.8 Curves of crude oil production by microbial huff-n-puff in Well SJS14X60

效果,对于黏度为 20 000 mPa·s 的稠油降黏率达到 90%。针对该类油井,近 5 a 实施 60 口井,有效率达到 78%,累积增油量为 1.4×10^4 t。

SJS10P2 井属于典型的热采多轮次稠油井,投

产以来共热采 10 个轮次,从第 6 轮次后热采效益变差,油气比仅为 0.2。实施微生物吞吐后最高日产量为 8.6 t/d,生产 220 d,累积产油量为 989 t,(拟)油气比达到 1.56,明显高于热采效益(图 9,表 3)。

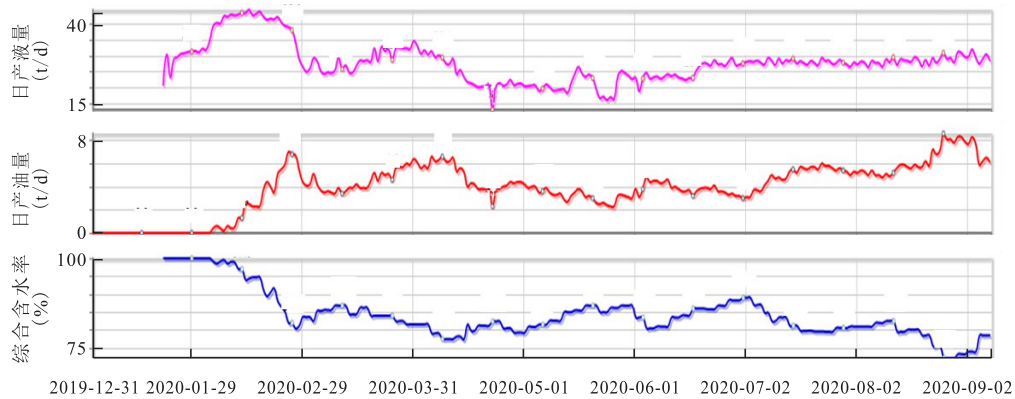


图9 SJS10P2井微生物吞吐生产曲线

Fig.9 Curves of crude oil production by microbial huff-n-puff in Well SJS10P2

表3 SJS10P2井微生物吞吐与末轮次蒸汽吞吐对比
Table3 Comparison between microbial huff-n-puff and steam huff-n-puff in Well SJS10P2

开发方式	最高日产量 (t/d)	最高日产油量 (t/d)	有效生产时间 (d)	措施后累积产油量 (t)	投入费用 (万元)	(拟)油气比
末轮次蒸汽吞吐	62.6	10.8	379	2 023	110	0.55
微生物吞吐	42.7	8.6	220	989	19	1.56

3.2.3 边底水稠油油藏

针对弱边底水稠油油藏,原油黏度高,边底水锥进,油井含水率高,采用氮气辅助微生物进行吞吐,近 5 a 共实施 18 口井,有效率为 77.8%,累积增油量为 3 200 t。

金 8-30 块属于典型的弱边底水稠油油藏,其中

JJJ8-P6 井实施微生物吞吐后含水率从 79.3% 降低到 36.1%,日产量由 1.5 t/d 提高 6.9 t/d,累积增油量为 1 250 t(图 10)。

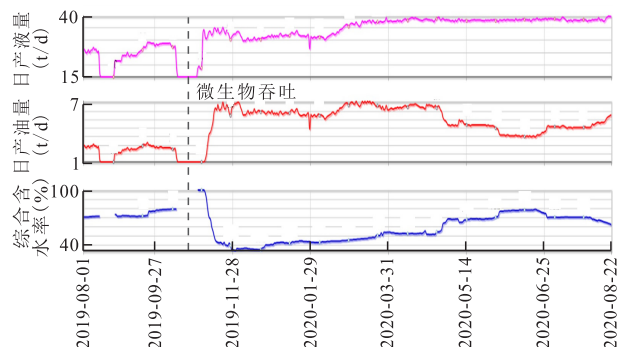


图10 JJJ8-P6井微生物吞吐生产曲线

Fig.10 Curves of crude oil production by microbial huff-n-puff in Well JJJ8-P6

针对强边底水稠油油藏,建立微生物复合堵水吞吐工艺,可以有效改善高含水油井的产液剖面,控制含水率,同时防止微生物大量注入水体,提高了微生物对原油的作用效率。近5 a共实施69口井,有效率为75.3%,累积增油量为 1.28×10^4 t。

ZXH139-P7井属于强边底水稠油井,热采开发过程中由于底水锥进,水窜迅速,2020年实施微生物复合堵水吞吐工艺,提高微生物与原油的接触效率,吞吐后,日产油量最高达到14.6 t/d,含水率降低至22.4%,截至目前累积增油量为807 t(图11)。

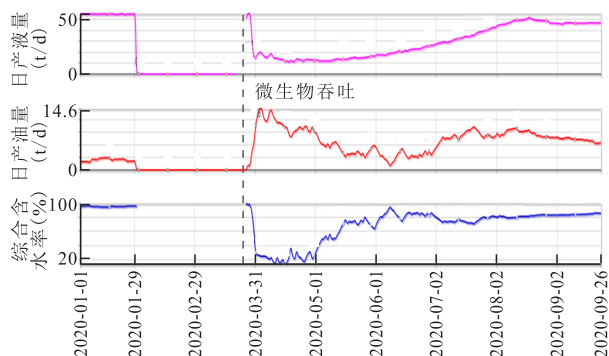


图11 ZXH139-P7井生产曲线

Fig.11 Curves of crude oil production in Well ZXH139-P7

4 结束语

胜利油田微生物驱油技术逐步发展成熟,形成了完善的技术体系,已在10个区块开展了微生物驱油现场试验,应用效果显著。截至2019年12月累积增油量为 30×10^4 t,投入产出比平均为1:5.7。微生物吞吐技术针对低效水驱、热采低效、活跃边底水等低效稠油井,形成了微生物复合 CO_2 、微生物复合生物表面活性剂、微生物复合氮气以及微生物复合堵水等多种吞吐工艺,现场实施400余井次,有效率为81.4%,平均单井增油量为243 t。

微生物采油要通过实施工艺优化、工艺集成,包括与注气、分层注采、堵水等工艺集成,提高微生物与剩余油接触效率,进一步拓宽微生物采油技术油藏适应范围和实施效果。

参考文献

- [1] SAFDEL M, ANBAZ M A, DARYASAFAR A, et al. Microbial enhanced oil recovery, a critical review on worldwide implemented field trials in different countries[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 74(7): 159-172.
- [2] 汪卫东. 我国微生物采油技术现状及发展前景[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(6): 87-90, 102.
WANG Weidong. Present study situation and development prospects of microbiological recovery technology in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(6): 87-90, 102.
- [3] 雷光伦. 微生物采油技术的研究与应用[J]. 石油学报, 2001, 22(2): 56-61.
LEI Guanglun. The research and application of microbial enhanced oil recovery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(2): 56-61.
- [4] 黄大炜. 一项科技含量高、发展迅猛的绿色环保技术——微生物强化采油[J]. 石油知识, 2008, (1): 12-13.
HUANG Dawei. A high-tech environmental protection technology with rapid development—microbial enhanced oil recovery[J]. Petroleum Knowledge, 2008, (1): 12-13.
- [5] WANG Weidong, LIN Junzhang, GENG Xueli, et al. MEOR field test at Block Luo801 of Shengli Oil Field in China[J]. Petroleum Science and Technology, 2014, 32(6): 673-679.
- [6] LI C F, LI Y, LI X M, et al. The application of microbial enhanced oil recovery technology in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Science and Technology, 2015, 33(5): 556-560.
- [7] 张蔚, 胡小丽, 邱轩, 等. 山东胜利油田沾3油藏微生物组特征[J]. 科学通报, 2019, 64(18): 1930-1942.
ZHANG Wei, HU Xiaoli, QIU Xuan, et al. Microbiomes in Zhanshan area, Shengli Oilfield, Shandong Province, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(18): 1930-1942.
- [8] 宋永亭, 胡婧, 吴晓玲, 等. 室温条件下油藏采出液微生物群落结构稳定性[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3): 495-501.
SONG Yongting, HU Jing, WU Xiaoling, et al. Study on microbial community structure in reservoir water samples at room temperature[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2017, 23(3): 495-501.
- [9] 胡婧, 孙刚正, 刘涛, 等. 模拟油藏条件下内源微生物群落空间分布规律[J]. 微生物学通报, 2019, 46(5): 1008-1017.
HU Jing, SUN Gangzheng, LIU Tao, et al. Spatial distribution of indigenous microbial communities under simulated reservoir conditions[J]. Microbiology, 2019, 46(5): 1008-1017.
- [10] 刘涛, 赵凤敏, 林军章, 等. 胜利油田辛68区块内源微生物驱油现场试验[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(2): 71-74.
LIU Tao, ZHAO Fengmin, LIN Junzhang, et al. Field test of indigenous microbial flooding in block Xin68 in Shengli oilfield[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2018, 47(2): 71-74.
- [11] 宋永亭, 李彩凤, 曹嫣, 等. 内外源微生物复合吞吐技术在常规稠油低效井中的研究与应用[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(3): 400-404.
SONG Yongting, LI Caifeng, CAO Yanbin, et al. Research and application of indigenous and exogenous microbial compound huff & puff technique in conventional heavy oil low-efficiency wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(3): 400-404.
- [12] 吴柏志, 李宜强, 张琪, 等. PBS菌的趋化性与提高原油采收率机理[J]. 油田化学, 2004, 21(4): 372-375, 390.
WU Baizhi, LI Yiqiang, ZHANG Qi, et al. Chemotaxis and mechanisms in microbial enhanced oil recovery by using bacteria PBS[J]. Oilfield Chemistry, 2004, 21(4): 372-375, 390.
- [13] BI Shuangyu, JIN Fan, SOURJIK Victor, et al. Inverted signaling by bacterial chemotaxis receptors[J]. Nature Communications,

- 2018,9(1):2927.
- [14] 宋永亭,李彩凤,冯云,等.高温产乳化剂菌原位生长下的微观驱油机理[J].油气地质与采收率,2018,25(2):90-95.
SONG Yongting, LI Caifeng, FENG Yun, et al. Microscopic oil displacement mechanism of thermophilic bioemulsifier-producing bacteria in-situ growing[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(2): 90-95.
- [15] 冯云,段传慧,林军章,等.中高温油藏内源微生物厌氧激活[J].生物加工过程,2016,14(3):12-16.
FENG Yun, DUAN Chuanhui, LIN Junzhang, et al. Anaerobic activation of indigenous microorganism in the middle and high temperature reservoir[J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2016, 14(3): 12-16.
- [16] 林军章,冯云,谭晓明,等.原油厌氧微生物降解特征分析[J].南京工业大学学报:自然科学版,2018,40(3):49-54.
LIN Junzhang, FENG Yun, TAN Xiaoming, et al. Characteristics of crude oil biodegradation by anaerobic microbial[J]. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2018, 40(3): 49-54.
- [17] ZARGARI S, OSTVAR S, NIAZI A, et al. Atomic force microscopy and wettability study of the alteration of mica and sandstone by a biosurfactant - producing bacterium *Bacillus thermodenitrificans* [J]. Journal of Advanced Microscopy Research, 2010, 5(2): 143-148.
- [18] COSTA S G V A O, De SOUZA S R D, NITSCHKE M, et al. Wettability of aqueous rhamnolipids solutions produced by *Pseudomonas aeruginosa* LBI[J]. Journal of Surfactants & Detergents, 2009, 12(2): 125-130.
- [19] 胡婧,吴晓玲.内源微生物驱油功能菌定量分析技术[J].生物加工过程,2016,14(3):23-26,32.
HU Jing, WU Xiaoling. Quantification of bacteria responsible for endogenous microbial enhanced oil recovery [J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2016, 14(3): 23-26, 32.
- [20] 陈琼瑶,刘涛,于瑶,等.一种微生物采油功能性激活剂激活特性及驱油性能[J].油田化学,2020,37(1):128-132.
CHEN Qiongyao, LIU Tao, YU Yao, et al. Activation characteristics and oil displacement performance of a new functional activator[J]. Oilfield Chemistry, 2020, 37(1): 128-132.
- [21] 刘涛,汪庐山,胡婧,等.微生物驱油过程中配气对菌群结构及驱油效果的影响[J].油田化学,2019,36(1):143-146,190.
LIU Tao, WANG Lushan, HU Jing, et al. Effect of gas distribution on flora structure and oil displacement in MEOR [J]. Oilfield Chemistry, 2019, 36(1): 143-146, 190.
- [22] 胡婧,郭辽原,孙刚正,等.动态驱替内源微生物生长代谢与驱油效率关系[J].石油学报,2020,41(9):1127-1134.
HU Jing, GUO Liaoyuan, SUN Gangzheng, et al. Relationship between the growth and metabolism of indigenous microorganisms and oil displacement efficiency during dynamic displacement [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(9): 1127-1134.
- [23] 胡婧,束青林,孙刚正,等.油藏内源微生物演替规律及其对驱油效果的影响[J].中国石油大学学报:自然科学版,2019,43(1):108-114.
HU Jing, SHU Qinglin, SUN Gangzheng, et al. Succession of indigenous microbe in reservoirs and its effect on displacement efficiency [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2019, 43(1): 108-114.
- [24] SUN Gangzheng, HU Jing, WANG Zenglin, et al. Dynamic investigation of microbial activity in microbial enhanced oil recovery (MEOR) [J]. Petroleum Science and Technology, 2018, 36(16): 1265-1271.
- [25] 郭辽原,张玉真,杨年文,等.邵家油田沾3块内源微生物驱激活剂优化及现场试验[J].油气地质与采收率,2012,19(1):79-81.
GUO Liaoyuan, ZHANG Yuzhen, YANG Nianwen, et al. Experimental study on activator optimization and indigenous microorganisms flooding and field tests in Zhan3 [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(1): 79-81.

编辑 经雅丽

特邀约稿人简介:



林军章,男,高级工程师,中国石化胜利油田石油工程技术研究院生物化学专家,获“山东省优秀科技工作者”、“胜利油田科技创新先进个人”和“胜利希望奖”等荣誉称号。

林军章同志长期从事微生物采油技术研发和技术推广工作,在厌氧微生物驱油技术和生物表面活性剂复合驱技术方向做出了突出贡献。作为技术首席先后承担并完成了10余项国家和省部级科研课题研究工作。研发了厌氧微生物驱激活剂体系,丰富了厌氧微生物提高采收率理论认识;建立了万吨级生物表面活性剂发酵生产工艺,形成生物表面活性剂复合驱油体系,并揭示了生物化学复合增效机制,大幅提高微生物采油技术油藏适应性和实施效果,为油田绿色高质量发展提供了技术支持。先后获得省部级科技进步二等奖2项,获国家授权发明专利15项,以独著或第一作者在《中国石油大学学报(自然科学版)》和《油气地质与采收率》等中文核心期刊发表论文13篇。