

文章编号:1009-9603(2021)02-0010-08

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.02.002

大庆油田微生物采油技术研究及应用

侯兆伟^{1,2,3},李蔚^{1,2},乐建君^{1,2},金锐^{1,2},窦绪谋^{1,2}

(1.国家能源陆相砂岩老油田持续开采研发中心,黑龙江大庆163412;2.中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院,黑龙江大庆163412;3.东北石油大学石油工程学院,黑龙江大庆163318)

摘要:大庆油田微生物采油技术始于20世纪60年代,历经50多年的持续攻关,基础研究和现场应用均取得一定进展。研究发现微生物存在主动趋向原油、黏附原油、产表面活性剂乳化原油3种趋向原油方式,确定实验菌株以氧化方式降解烷烃、芳香烃的降解机理。在室内研究的基础上,针对特低渗透油田开展外源微生物现场试验,实施微生物吞吐试验93口井,单井平均增油量为149 t,吨增油菌液和激活剂成本为300元;在特低渗透油田开展微生物驱替试验,朝阳沟油田累积增油量为 6×10^4 t,采收率提高4.95个百分点,吨增油菌液和激活剂成本为557元,并明确注采关系是影响微生物驱效果的主要因素。对大庆油田水驱、聚合物驱和复合驱后典型油藏菌群结构特征进行系统研究,研制出高效激活剂配方,在萨南油田聚合物驱后油藏开展了1注4采内源微生物驱现场试验,采收率提高3.93个百分点,吨增油激活剂成本为643元。

关键词:微生物驱;微生物吞吐;低渗透;聚合物驱后;增油降水

中图分类号:TE357.9

文献标识码:A

Research and application of microbial enhanced oil recovery technology in Daqing Oilfield

HOU Zhaowei^{1,2,3}, LI Wei^{1,2}, LE Jianjun^{1,2}, JIN Rui^{1,2}, DOU Xumou^{1,2}

(1.National Energy Continental Sandstone Maturing Oilfield Sustainable Production Research and Development Center, Daqing City, Heilongjiang Province, 163412, China; 2.Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield, CNPC, Daqing City, Heilongjiang Province, 163412, China; 3.College of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing City, Heilongjiang Province, 163318, China)

Abstract: The microbial oil enhanced recovery technology in Daqing Oilfield has been put into operation since the 1960s. More than 50 years of sustained efforts has witnessed encouraging progress in basic research and field applications. The study found that microorganisms actively migrated to crude oil, adhered to it, or produced surfactant to emulsify it. Besides, it was determined that the alkanes and aromatic hydrocarbons were degraded by experimental strains through oxidation. On the basis of laboratory research, field tests on exogenous microorganisms were carried out in extra-low permeability reservoirs, and 93 wells were subject to microbial huff-n-puff tests. Results demonstrate that the average oil increase per well was 149 t, and the cost of bacteria solution and activators per ton of oil increase was CNY 300. In addition, the microbial flooding tests in extra-low permeability reservoirs proved that the accumulative oil increase in Chaoyanggou Oilfield was 60 000 t, with the enhanced oil recovery of 4.95%, and the cost of bacteria solution and activators per ton of oil increase was CNY 557. In particular, it is clarified that the injection-production system was the main factor affecting the microbial flooding. The microbial community structure of typical reservoirs after water flooding, polymer flooding, and combined flooding in Daqing Oilfield were systematically studied to develop highly effective activators. Endogenous microorganism flooding tests with 1 injector and 4 producers in reservoirs after polymer flooding were carried out in Sanan Oilfield, which enhanced the oil recovery by 3.93%, and the activator cost per ton of oil increase was CNY 643.

收稿日期:2020-12-11。

作者简介:侯兆伟(1975—),男,山东成武人,高级工程师,在读博士研究生,从事三次采油方面的研究工作。E-mail:houshw@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“大庆油气持续有效发展关键技术研究与应用”(2016E-0206)。

Key words: microbial flooding; microbial huff-n-puff; low permeability; after polymer flooding; oil increase and water decrease

微生物采油是一项利用微生物代谢产物和微生物自身活动来增产或提高采收率的采油技术,具有适用范围广、工艺简单、成本低、绿色无污染等优点^[1-4]。自20世纪60年代以来,在大庆油田一直开展微生物采油技术的研究,是中国率先开展微生物采油现场试验的油田,1990年在其中区东部油水过渡带的稠油区进行了2口井的微生物吞吐试验,累积增油量为1468 t^[5],但所用碳源为糖类碳水化合物,成本较高。“九五”期间开展了以原油烃为碳源的微生物菌种筛选研究,实现了碳源由碳水化合物向碳氢化合物的转变^[6],先后筛选出具有降解、产表面活性剂等功能的系列菌种200多株。2007年以来,针对微生物摄取、降解原油机理开展研究,明确了微生物趋向原油和降解原油的方式及影响因素^[7-8]。在室内研究的基础上,成功开展了低渗透油藏外源微生物驱和聚合物驱后油藏内源微生物驱现场试验,并取得了较好的应用效果^[9-11]。

1 微生物的原油趋向性机理

在微生物采油技术的应用过程中,微生物趋向原油的方式、趋向原油过程的调控对其发挥采油作用至关重要^[12-14]。

1.1 用于趋向性研究的微生物选择

实验室筛选出具有良好降解烃及产表面活性剂能力的用于趋向性研究的采油菌株7株(表1)。挑取采油菌株单克隆于肉汤培养基中活化,以体积分数为5%的接种量接入无机盐培养基中,45℃震荡培养5d,制备种子液。将种子液以体积分数为5%的接种量接入原油培养基中,45℃震荡培养5d,观察采油菌株对原油的作用效果,并采用红外分光测油仪测定菌株对原油的降解率。由实验结果(表1)可以看出,所选菌株均可以不同程度地乳化降解原油,作为采油菌株具有较好的代表性。

1.2 微生物趋向原油的方式

为研究微生物趋向原油的方式,建立了96孔板宏观模型和凹陷显微玻片微观模型,其中96孔板宏观模型是将96孔酶标板四周密封,形成一个由酶标板上、下层之间构成的空间,在顶盖的两端钻孔,分别加入菌液及原油,将模型放至该菌最适宜温度培养8~24h后,在酶标仪中测量光密度(OD)值,利用酶标板剩余92个孔的OD值绘制微生物趋向原油的

表1 用于趋向性研究的采油菌株及对原油的乳化降解作用效果分析

Fig.1 Analysis of oil production strains used for chemotaxis study and their effect of emulsification and degradation for crude oil

菌株	菌种鉴定结果	趋向性	原油乳化效果	原油降解率(%)
1507	耐盐短杆菌	R, M, C	原油完全乳化,并且原油呈粉末状,上、下不分层	60.5
6-1B	铜绿假单胞	F, M, C	原油完全乳化,并且原油呈粉末状,上、下分层	50.8
Dg2A	寡养单胞菌	R, M, C	原油完全乳化,并且原油呈粉末状,上、下分层	55.7
5-016	微球菌属	F, M, C	原油完全乳化,并且原油呈粉末状,上、下不分层	45.4
12-J	基内苍白杆菌	F, M, C	原油完全乳化,并且原油呈粉末状,上、下不分层	67.6
Us-1	枯草芽孢杆菌	F, M, C	原油完全乳化,并且原油呈粉末状,上、下不分层	64.3
7N11	地芽孢杆菌	F, M, C	原油完全乳化,并且原油呈粉末状,上、下不分层	47.5

注:R为滑动,M为运动,C为趋向性,F为鞭毛。

运动趋势图。凹陷显微玻片微观模型是利用单凹载玻片制片法,建立一个微观可视化空间,通过显微镜下细菌运移情况的观察,研究微生物以原油为碳源的趋向性运动规律。由于大部分细菌可以对多种引剂产生趋向性,因此,研究采油菌株对多种引剂的趋向性有助于进行细菌趋油性的横向对比评价。通过实验研究了采油菌株对碳源、氮源、生长因子、无机盐等的趋向性,细菌对引剂的趋向性具有选择性,且这种选择性从易到难,细菌首先趋向能量效率最高的引剂并加以利用,实验结果反映出菌株对多种引剂的能量依赖性程度。利用这2种模型对微生物趋向原油过程中细菌浓度、趋向性系数以及代谢产物的变化进行研究,得出主动趋向原油、黏附原油和产表面活性剂乳化原油共3种微生物趋向原油的方式(图1)。

主动趋向原油的微生物的趋油能力主要表现在微生物浓度相对于原油的空间变化,该种微生物趋向原油具有明显的趋化带和趋油梯度,且受氧含量、运动缓冲液和矿化度等条件的影响。其中运动缓冲液($\text{KH}_2\text{PO}_4:\text{Na}_2\text{HPO}_4=1:1$)有利于细菌保持良好的运动性,从而增强细菌的趋油性,使细菌在原

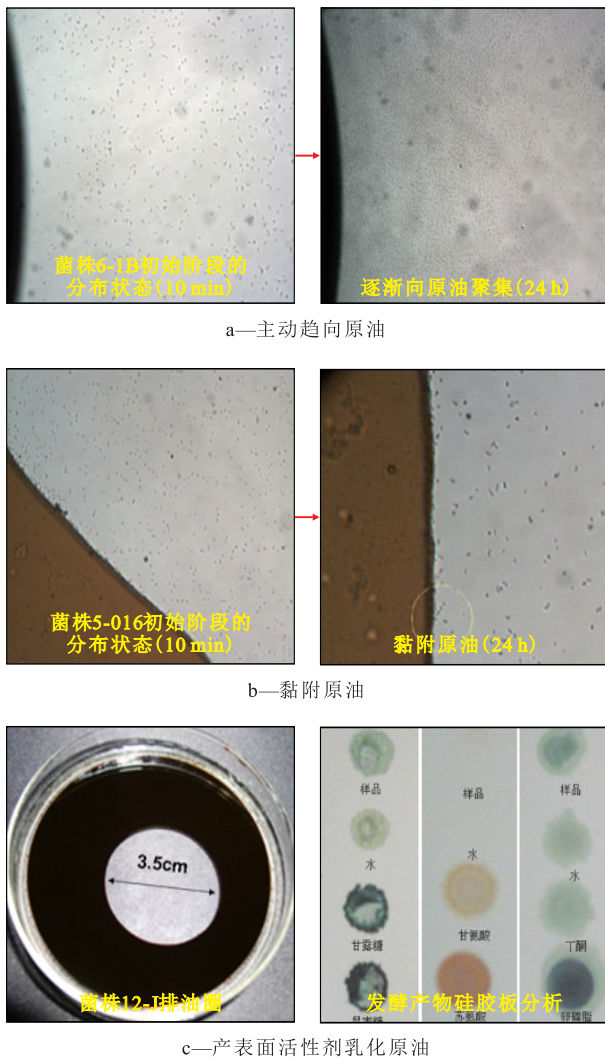


图1 3种微生物趋向原油方式

Fig.1 Three migration modes of microorganisms to crude oil

油周围形成趋化带,采油菌与原油的密切接触促进了对原油的降解。以黏附原油方式趋向原油的微生物,其趋油能力主要表现在不同的生长周期微生物细胞表面的疏水性不同,疏水性越强,越易发生趋向;黏附原油主要依靠微生物细胞表面的疏水性物质,其疏水性有利于微生物在原油表面黏附聚集,添加表面活性剂等营养物质,可以较好地促进该种微生物繁殖并协同表面活性剂黏附原油。通过研究发现表面活性剂对细菌本身没有激活作用,而是通过乳化原油增加了细菌与原油的接触机会,而接触的增加源于细菌的趋油性及黏附作用。在该过程中,表面活性剂乳化原油,使其亲水性增强、溶解度增加。依靠产生表面活性剂乳化原油的微生物,其趋油能力主要表现在产生的表面活性剂的质量浓度的高低;通过优化培养条件,提高微生物自身表面活性剂的产量和速率,能够加速微生物在原油表面的聚集。

2 微生物降解原油机理

大庆油田的原油含蜡量高,为凝点高的石蜡基原油,高碳烷烃和芳香烃对黏度的影响较大。利用氢放射性同位素氘对石油烃组分进行标记,通过降解过程中的中间代谢产物的气相色谱-质谱和同位素标记物检测分析,可以阐明微生物降解多环芳香烃的机理及途径。

2.1 微生物降解芳香烃(芴)中间代谢产物鉴定

利用微生物 DQ8(铜绿假单胞菌)进行芳香烃(芴)的降解实验。将芴降解 1 d 后的样品进行气相色谱检测,结果显示,中性样品中出现多个峰,而未衍生的酸性样品峰很少,且中性样品中多种物质在酸性样品中未出现,可见气相色谱检测的方法对代谢物中的酸性和中性样品具有很好的分离能力。

将微生物降解芳香烃(芴)的中性样品进行质谱鉴定,得到中间代谢产物 I, II 和 VI(图2),其中 I 为代谢底物芴的质谱检测结果,与数据库中标准样品的质谱检测结果吻合很好;芳香烃(芴)降解 1 d 后,酸性样品甲基化衍生后气相色谱检测到中间代谢产物 III, IV 和 VII(图2)。质谱鉴定结果验证了酸

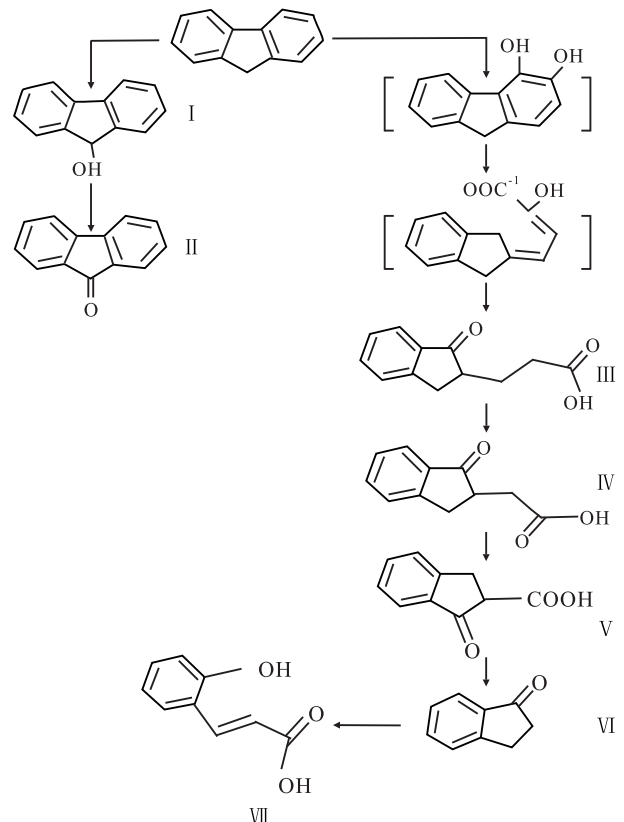


图2 微生物 DQ8 降解芳香烃(芴)中间代谢产物

Fig.2 Microbial metabolites of fluorene by microorganism DQ8

性样品甲基化衍生后气相色谱检测的方法可以较好地代谢产物中的中性样品和酸性样品分离,增强了酸性样品衍生物检测的针对性,为后续研究打下了良好的基础。

利用氘代茛进行降解实验及中间代谢产物鉴定实验。通过休止细胞反应,从反应体系中鉴定得到3种降解产物,从中性样品中鉴定出D-9-茛醇,从酸性样品中鉴定出羧基甲基化的茛酮乙酸和茛酮丙酸。这3种代谢产物与非同位素标记化合物代谢中间产物一致。

2.2 微生物降解芳香烃(茛)途径

降解过程中间代谢产物鉴定和同位素标记代谢产物检测结果表明,微生物降解芳香烃(茛)存在2条代谢途径:一是9位两步单加氧反应生成9-fluorenone;二是3,4位双加氧,然后开环,经过连续两步氧化,然后氧化脱羧、氧化开环生成反式-2-羟基肉桂酸,表明实验菌株对多环芳香烃氧化开环后产物进一步脱羧降解的过程为 α -氧化方式^[15-16]。

为了进一步探讨微生物驱油机理,在对微生物作用前后单一烷烃和芳香烃分析的基础上,建立了乙醇-氢氧化钠-正己烷萃取体系,对原油中极性含氧化合物进行了提取分离,甲酯化后,采用气相色谱-质谱检测方法对菌株DQ4和HT降解原油后的油相和水相提取物中酸、醇等物质进行了分析。结果显示:油相中脂肪酸由作用前的7种分别增至17和24种,质量分数由作用前的1.05%分别升高至60.05%和61.02%,2种菌株作用大庆油田原油后都有新的醇产生,且新产生的醇相近,均以一元醇为主,碳数在20以下;水相中检测到乙酸、丙酸、丁酸、异戊酸4种有机酸。原油中极性含氧化合物的分析结果进一步验证了微生物降解烷烃和芳香烃途径的判断。

3 应用实例

基于微生物原油趋向性机理和降解原油机理,结合低渗透和聚合物驱后油藏特征,研制出适合大庆油田油藏条件的微生物吞吐技术、外源微生物驱技术和内源微生物驱技术,并开展了现场试验。

3.1 微生物吞吐技术

微生物吞吐技术是大庆油田单井增产增注措施。自2001年以来,针对由于近井地带堵塞导致供液不足、产量递减快以及采油速度低的油井,筛选出以无机氮、磷为主要营养物的短短芽孢杆菌和蜡

状芽孢杆菌。微生物吞吐技术采用移动式撬装注入方式,利用环套空间将配伍菌液和营养物注入到采油井井底,先后在外围低渗透油田进行了93口井的微生物吞吐试验,总成功率为74.2%,平均单井增油量为149 t,累积增油量为 1.39×10^4 t(表2),吨增油菌液和激活剂成本为300元。

表2 大庆油田微生物吞吐试验
Table2 Field tests of microbial huff-n-puff in Daqing Oilfield

试验区块	年份	试验井数(口)	渗透率(mD)	平均单井注入菌液量(t)	平均单井增油量(t)	累积增油量(t)	成功率(%)
朝阳沟油田	2002	60	1~25	2.4	152.9	9 175	71.7
葡北油田	2004	10	20~300	4.7	187.3	1 873	80.0
杏南和高台子油田	2007	23	10~450	2.8	122.0	2 805	78.3

3.1.1 解决近井堵塞

微生物吞吐技术可以减少近井地带污染并增加原油流动性,有效地解决近井堵塞。以朝阳沟油田朝72-76井为例,该井于2003年采取微生物吞吐措施,共注入微生物菌液量为4.5 t,吞吐前平均日产油量为3.0 t/d,吞吐后平均日产油量为7.1 t/d,阶段累积增油量近200 t。在吞吐前测压时,利用压力恢复曲线参数解释的表皮系数为2.56,井底污染严重。采取微生物吞吐措施1个月后的表皮系数为-1.44,近井地带阻力明显降低,渗透率由10.9 mD增至12.5 mD,说明微生物能够减少油井近井地带的污染。油井朝61-杨121实施微生物吞吐后,在微生物的作用下原油含蜡量下降了35.3%,含胶量下降了36.4%,产出液界面张力下降了40%,使得该井原油的流动能力显著增强;吞吐后,平均日产油量从0.4 t/d增至5.2 t/d,平均含水率由95.6%下降至29%,阶段累积增油量达556.7 t^[17-18]。

3.1.2 单井多轮次周期应用

2003年对朝阳沟油田前期微生物吞吐见效的4口井实施第2轮吞吐,取得与第1轮吞吐相当的增油效果,表明单井微生物吞吐技术可以作为一种增产措施在同一口油井多次应用。其中,油井100-66在施工后开井初期产液量大幅度上升,第1轮吞吐后日增油量为0.9 t/d,阶段累积增油量为92.5 t;第2轮吞吐后日增油量为1.5 t/d,阶段累积增油量为291.9 t;第2轮吞吐效果明显好于第1轮吞吐效果(图3)。因此,针对微生物吞吐有效周期过后出现含水率增高、水驱低效及无效的油井,单井微生物吞吐技术可以作为一种增产增注措施多次应用。

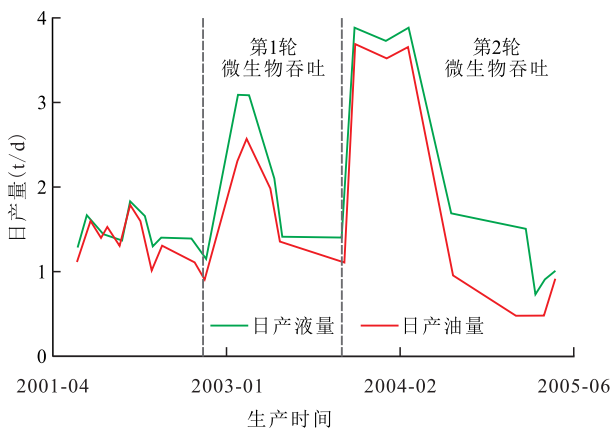


图3 朝阳沟油田100-66井产液动态分析

Fig.3 Dynamic fluid production of Well100-66 in Chaoyanggou Oilfield

3.2 外源微生物驱技术

针对大庆油田外围油田储层渗透率低、储量丰度低和油井产量低等开发问题,利用复配外源微生物的降黏和产表面活性剂等机理,先后在朝阳沟油田进行了2注10采先导试验和9注24采扩大微生物驱试验。2004年开展2注10采先导试验,至2009年7月底,10口油井中有7口见效,试验区含水率由46.8%降至最低的40.3%,月产油量由361 t/月最高上升至843 t/月,阶段累积增油量为 1.45×10^4 t。在先导试验成功的基础上,2009年实施扩大微生物驱试验,全区日产油量从32.4 t/d最高上升至49.6 t/d,截至2018年,在注入量仅为0.03 PV的条件下,累积增油量为 6×10^4 t,采收率提高4.95个百分点,吨增油菌液和激活剂成本为557元。自2000年以来,朝阳沟油田朝50区块的动态数据统计结果显示(图4),微生物驱技术可以有效减缓产量递减趋势,是特低渗透油田改善开发效果的有效方法^[19-20]。

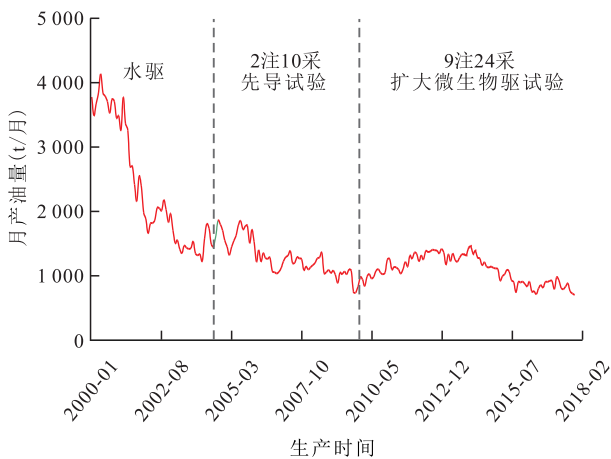


图4 朝阳沟油田朝50区块微生物驱试验产量变化

Fig.4 Oil production during microbial flooding tests in Block Chao50 of Chaoyanggou Oilfield

3.2.1 具有较好的油藏适应性和驱油能力

对微生物注入前后油井采出液微生物浓度进行检测,注入前油井采出液微生物浓度为 $10^3 \sim 10^4$ 个/mL,见效油井采出液微生物浓度一直保持在 10^6 个/mL左右,说明微生物在地层中繁殖生长,具有较好的油藏适应性,且从注入井穿过整个油层到达油井的产出端。

室内对比油藏条件下微生物作用前后原油变化情况发现,试验区微生物作用后平均地层原油黏度由94.3 mPa·s降至76.0 mPa·s,油水界面张力由46.3 mN/m降至39.8 mN/m。正构烷烃气相色谱检测结果显示,原油中的低碳组分增加,中高碳数烷烃减少,说明外源微生物在地层中能够有效降解原油的重质组分,代谢产生活性物质。同时外源微生物能够改善油层的吸水效果,动用程度提高。注入微生物后,试验区油层新增4个吸水层,油层吸水厚度增加8.1个百分点,注入的外源微生物在油层中有效地发挥了作用。

3.2.2 注采关系是影响效果的主要因素

从整个试验区各油井见效时间来看,沿主河道砂体和裂缝发育方向油井见效早,增产效果最为明显,微生物更多地随着注入水进入到吸水能力较强、含水率较高的主力油层。例如61-121井注入微生物3个月后果效,在产液量未见显著变化的情况下,日产油量由试验前的0.72 t/d上升至2.31 t/d,含水率由80.4%下降至45.9%(图5)。与之相比,处于非裂缝发育方向、含水率低且吸水状况差的砂体边部以及二类油层的油井则见效较晚,例如66-126井2009年9月开始注入微生物,2010年7月产量才出现上升,见效时间为10个月左右。

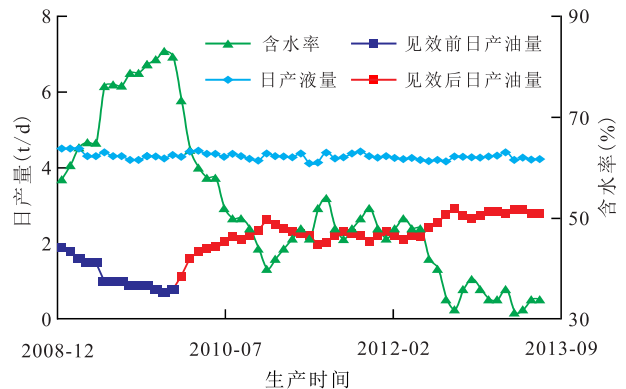


图5 朝阳沟油田61-121井产液动态分析

Fig.5 Dynamic fluid production of Well61-121 in Chaoyanggou Oilfield

针对上述情况,为增强油井吸水能力,改善注采关系,对微生物驱试验区部分位于砂体边部的含

水率低的油井进行微生物吞吐,均取得良好的增油效果。例如62-120井前期增产效果不明显,日产液量为2.1 t/d,日产油量为1.5 t/d,含水率为29.4%,2010年10月实施单井微生物吞吐后,日产液量和日产油量分别上升至4.49和2.7 t/d,含水率上升至38%,并且一直保持较高的产能状态,至2014年6月日产油量仍为2.5 t/d左右(图6)。考虑到单井微生物吞吐的有效时间一般为3~9个月,认为该井增产效果主要是微生物驱作用。因此,在低渗透油田可以考虑微生物驱与压裂等措施结合应用,以取得更好的效果。2017年5月朝50区块的产量仍保持在十年前水平,表明微生物驱技术可以作为外围油田提高采收率、控制产量递减的有效方法。同时微生物驱作为一种以水驱为载体的三次采油技术,注入的微生物菌液主要沿水线方向推进,试验效果仍受注采关系和连通状况的影响。

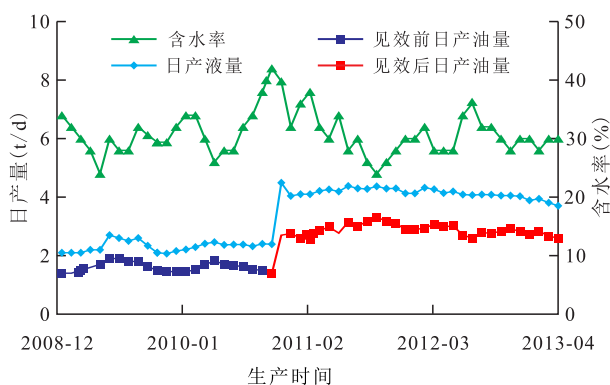


图6 朝阳沟油田62-120井产液动态分析

Fig.6 Dynamic fluid production of Well 62-120 in Chaoyanggou Oilfield

3.3 内源微生物驱技术

大庆油田聚合物驱工业化应用的动用储量达 10.45×10^8 t,平均采出程度为56.7%,进入后续水驱的地质储量为 7.86×10^8 t,具有进一步提高采收率的巨大潜力,是油田持续开发的优质资源。自2007年以来,开展了不同类型油藏内源微生物群落研究,显示聚合物驱后油藏具有丰富的微生物资源^[21-22],适合开展内源微生物驱油^[23-24]。针对聚合物驱后剩余油无法有效驱替的问题,利用微生物驱的产气、降黏和产表面活性剂机理,进一步提高聚合物驱后油藏采收率,自2011年开展了萨南油田聚合物驱后油藏1注4采的2轮内源微生物驱试验(图7)。从2011年12月开始分2个周期共计注入激活剂0.05 PV,试验区日产液量由482 t/d最高增至560 t/d,日产油量由18.1 t/d最高增至31.5 t/d,综合含水率由96.2%下降至93.9%,累积增油量为6 243 t,采收率提高3.93个百分点,吨增油激活剂成本为643元。

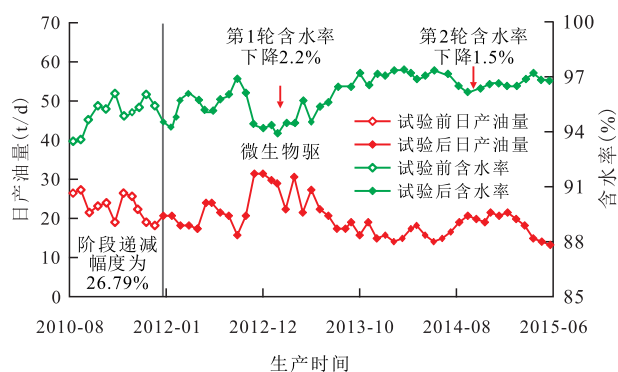


图7 萨南油田内源微生物驱试验区生产动态变化

Fig.7 Oil production during endogenous microorganism flooding tests in Sanan Oilfield

现场试验效果证实,利用微生物驱技术进一步提高聚合物驱后油藏采收率具有可行性^[25]。

试验区微生物菌群结构的动态变化研究结果表明,激活3~5个月后油藏微生物的种类逐渐减少,4口采油井N2-D3-P40, N2-D2-P40, N2-2-P141和N2-2-P140具有降解和产气功能的目标菌陶厄氏菌属和具有产表面活性剂能力的目标功能菌数量增加,主要目标功能菌群被有效激活,成为油藏优势菌群。古菌含量在激活前后的变化较小,优势古菌为具有产气功能的甲烷丝状菌属和甲烷微菌属。

激活后的内源微生物产生大量生物气,随着激活剂注入呈现明显的两阶段产气特征。第1阶段产气量大、周期短,以微生物降解原油代谢产生的二氧化碳气为主;第2阶段产气相对缓慢,气体主要为厌氧甲烷菌作用后的甲烷气。第1轮激活剂注入压力升高2.2 MPa,第2轮压力升高2.6 MPa,产气是激活油藏内源微生物驱油的重要机理之一^[26]。

4 结论

针对大庆油田研究出不同微生物趋向原油的方式以及关键影响因素,明确了微生物降解原油的途径。在机理研究的基础上,筛选出适用于大庆油田外围低渗透、老区高含水率及稠油过渡带、聚合物驱后等不同类型的油藏的微生物,为不断提高微生物采油技术的实施效果,进而指导现场应用奠定了基础。针对大庆油田低渗透和化学驱后油层开展微生物采油技术研究,对于油层发育好、微生物丰度高的长垣油田老区聚合物驱后油藏,应充分发挥内源微生物成本低的优势,以内源微生物驱为主;对于微生物种类少、部分采油功能菌缺失的外围油田,在充分利用油藏内源微生物的基础上,应补充

相应的外源菌,采用内、外源微生物驱技术相结合的方法。已开展的外围特低渗透和聚合物驱后油层先导性试验均取得较好的开发效果,经济效益突出,为中外同类型油藏利用该技术提供了重要的借鉴。针对大庆油田将进一步研发高效微生物驱油体系,不断扩大微生物采油技术在外围油田、化学驱后油藏的应用规模。

参考文献

- [1] 刘金峰,牟伯中.油藏极端环境中的微生物[J].微生物学杂志,2004,24(4):31-34.
LIU Jinfeng, MU Bozhong. Extreme environment of oil reservoir and associated microorganisms[J]. Journal of Microbiology, 2004, 24(4):31-34.
- [2] 郭英.国内外源微生物驱矿场试验状况分析[J].科技导报,2011,29(22):51-54.
GUO Ying. Exogenous microbial enhanced water-flooding pilot tests in China[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(22): 51-54.
- [3] 雷光伦,马继业,汪卫东,等.微生物提高采收率微观机制[J].中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(3):108-113.
LEI Guanglun, MA Jiye, WANG Weidong, et al. Micromechanism of microbial enhanced oil recovery[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2009, 33(3): 108-113.
- [4] 冯世功.突破第三次采油的生物科学[J].石油勘探与开发,1987,14(5):89-92.
FENG Shigong. Breakthrough of the third oil recovery technology of the biological science[J]. Petroleum Exploration and Development, 1987, 14(5): 89-92.
- [5] 张春英,孟凡儒,石梅,等.大庆油田微生物提高采收率的矿场试验[J].石油学报,1995,16(1):88-95.
ZHANG Chunying, MENG Fanru, SHI Mei, et al. A pilot EOR test by in-situ micro organism fermentation in Daqing oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(1): 88-95.
- [6] 隋军,石梅,孙凤荣,等.以石油烃类为唯一碳源提高采收率菌种的研究[J].石油学报,2001,22(5):53-57.
SUI Jun, SHI Mei, SUN Fengrong, et al. Microbial EOR studies on the microorganisms using petroleum hydrocarbons as sole carbon source[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(5): 53-57.
- [7] 徐婷,余跃惠,何延龙,等.微生物驱矿场采出液中生物代谢产物[J].大庆石油地质与开发,2020,39(2):107-113.
XU Ting, SHE Yuehui, HE Yanlong, et al. Microbial metabolites in the produced liquid for MEOR field[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(2): 107-113.
- [8] 伍晓林,侯兆伟,李蔚,等.原油黏附性细菌的运动及其调控研究[J].油田化学,2013,30(1):87-91.
WU Xiaolin, HOU Zhaowei, LI Wei, et al. The study on migration of adhesive bacteria to crude oil[J]. Oilfield Chemistry, 2013, 30(1): 87-91.
- [9] 黄学,伍晓林,侯兆伟.短短芽孢杆菌和蜡状芽孢杆菌降解原油烃机制研究[J].石油学报,2006,27(5):92-95.
HUANG Xue, WU Xiaolin, HOU Zhaowei. Mechanism of degradation for petroleum hydrocarbon by *Brevibacillus brevis* and *Bacillus cereus*[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(5): 92-95.
- [10] 伍晓林,赵玲侠,马挺,等.大庆油田聚驱后油藏内源微生物激活剂的筛选和效果评价[J].南开大学学报:自然科学版,2012,45(4):105-111.
WU Xiaolin, ZHAO Lingxia, MA Ting, et al. Screening and effect evaluating the activator for indigenous microbe of Daqing flowing gel flood reservoirs[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2012, 45(4): 105-111.
- [11] 乐建君,刘芳,张继元,等.聚合物驱后油藏激活内源微生物驱油现场试验[J].石油学报,2014,35(1):99-106.
LE Jianjun, LIU Fang, ZHANG Jiyuan, et al. A field test of activation indigenous microorganism for microbial enhanced oil recovery in reservoir after polymer flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 99-106.
- [12] WADHAMS G H, ARMITAGE J P. Making sense of it all: Bacterial chemotaxis[J]. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 2004, 496(5): 1 024-1 037.
- [13] GUMARGALIEVA K Z, KALINA I G, GENNADI E, et al. Biodegradation of polymers and adhesion properties of microorganism cells[J]. Polymer Degradation and Stability, 1995, 47(3): 363-368.
- [14] 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.
- [15] 伍晓林,郝文辉,侯艳君,等.大庆油田微生物采油代谢成分对比分析的研究[J].黑龙江大学自然科学学报,2003,20(2):100-105.
WU Xiaolin, HAO Wenhui, HOU Yanjun, et al. A comparative composition analysis of microbial degradation of crude oil of Daqing oil fields[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2003, 20(2): 100-105.
- [16] 伍晓林,侯兆伟,陈坚,等.采油微生物发酵液中有机酸(醇)的GC-MS分析[J].大庆石油地质与开发,2005,24(1):93-95.
WU Xiaolin, HOU Zhaowei, CHEN Jian, et al. GC-MS analysis on the organic acid (alcohol) in the microbial fermentative liquid[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(1): 93-95.
- [17] HOU Zhaowei, WU Xiaolin, SHI Mei, et al. The mechanism and application of MEOR by *Brevibacillus brevis* and *Bacillus cereus* in Daqing oilfield[C]. SPE 97469, 2005.
- [18] 袁旭军,叶晓瑞,鲍为,等.低渗透油田开发的难点和主要对策[J].钻采工艺,2006,29(4):31-32.
YUAN Xujun, YE Xiaorui, BAO Wei, et al. Difficulties and countermeasures on low permeability reservoir development[J]. Drilling & Production Technology, 2006, 29(4): 31-32.
- [19] 巢华庆.大庆低渗透油田开发技术与实践[J].大庆石油地质与

- 开发,2000,19(5):1-3.
- CHAO Huaqing. Development technology and its application in low permeable oil and gas fields in the peripheral part of Daqing [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2000, 19(5):1-3.
- [20] 李莉,韩德金,周锡生.大庆外围低渗透油田开发技术研究[J].大庆石油地质与开发,2004,23(5):85-87.
- LI Li, HAN Dejin, ZHOU Xisheng. Development technique of outlying low permeability pools of Daqing oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(5):85-87.
- [21] 石梅,王志瑶,陈宗运,等.大庆油藏本源微生物生态分布规律的研究[J].大庆石油地质与开发,2004,23(5):100-102.
- SHI Mei, WANG Zhiyao, CHEN Zongyun, et al. Organism distribution of source microbe in Daqing oil reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(5):100-102.
- [22] 杨振宇,石梅,王大威,等.大庆油田本源微生物群落分布及采油机理研究[J].石油学报,2006,27(增刊1):95-100,105.
- YANG Zhenyu, SHI Mei, WANG Dawei, et al. Study on autochthonous microorganism community distribution and oil recovery mechanism in Daqing Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27 (Supplement1):95-100, 105.
- [23] 李辉,牟伯中.油藏微生物多样性的分子生态学研究进展[J].微生物学通报,2008,35(5):803-808.
- LI Hui, MU Bozhong. Recent advances in molecular microbial ecology of petroleum reservoirs [J]. Microbiology China, 2008, 35 (5):803-808.
- [24] 向廷生,刘小波,张敏,等.大庆油田本源微生物分布与定向激活机制[J].中国科学:D辑 地球科学,2008,38(增刊II):117-122.
- XIANG Tingsheng, LIU Xiaobo, ZHANG Min, et al. Distribution and mechanisms of orientational activation of indigenous microorganism in Daqing oilfield [J]. Science in China: Series D Earth Sciences, 2008, 38(Supplement II):117-122.
- [25] LE Jianjun, WU Xiaolin, WANG Rui, et al. Progress in pilot testing of microbial-enhanced oil recovery in the Daqing oilfield of north China [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2015, 97:188-194.
- [26] 代学成,王红波,许念,等.内源微生物驱油激活配方筛选评价指标探讨[J].油气地质与采收率,2012,19(2):37-40.
- DAI Xuecheng, WANG Hongbo, XU Nian, et al. Study on activation blend evaluation for indigenous microbial flooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2):37-40.

编辑 邹滢滢

胜利油田获批筹建山东省非常规 油气勘探开发重点实验室

近日,山东省科学技术厅正式下文批准筹建16个省重点实验室。其中,胜利油田以勘探开发研究院作为依托单位,获批筹建“山东省非常规油气勘探开发重点实验室”。该实验室也是勘探开发研究院继“中国石化化学驱提高石油采收率重点实验室”“中国石化页岩油气勘探开发重点实验室”和“中国石化气驱提高石油采收率重点实验室”等3个省部级重点实验室之后,再次获批的省级重点实验室,也是胜利油田第2个山东省重点实验室。

胜利油田非常规油气资源丰富,其中济阳坳陷页岩油气资源量约为40亿吨。但相对于北美地区的海相沉积页岩油,济阳坳陷陆相富油盆地形成时间晚,热演化程度偏低,具有油质重、黏度高、流动能力弱以及脆性较差等特点,有效开发和规模动用难度大。近2年来,胜利油田多口页岩油气勘探井先后取得突破,展现了该领域即将成为胜利油田产能增长重要接替阵地的良好前景,但也凸显出相关勘探开发技术储备尚不成熟完善的问题。此次,依托山东省非常规油气勘探开发重点实验室,胜利油田将加大非常规领域油气勘探开发前沿基础理论和关键技术的攻关力度,助推形成适用于非常规油气高效勘探开发的新理论、新方法和新技术,并以此为契机,努力推动胜利油田“产、学、研一体化”高层次学术科研基地的建设,打造一支在非常规油气勘探开发领域高水准的科研攻关学术团队,形成一套技术领先的非常规油气勘探开发技术系列,积极推动前沿理论和关键技术的成果转化,努力将重点实验室打造为国际一流的科研平台,以品牌建设推动胜利油田“高效勘探、效益开发”目标的实现。