

稠油微生物开采矿场试验研究——以新疆油田为例¹

黄世伟¹, 张廷山¹, 霍进², 姜照勇¹, 董同武¹, 武海燕¹

¹ 西南石油学院资源与环境学院 (610500)

² 新疆油田分公司重油开发公司 (843000)
dingjin2008@126.com

摘要: 为了提高原油采收率, 提高稠油油藏开发效益, 与新疆油田合作开展了稠油微生物开采的矿场试验。试验优选了混源采油菌组合, 采用单井吞吐的生产方式, 分两批对 21 口稠油开发井进行了微生物开采矿场试验。经采油菌作用, 作业区的稠油粘度大幅度降低, 在停止注蒸汽的情况下, 大多数试验井都能达到经济产能, 试验得到了较高的投资回报率。结果表明, 所选用的采油菌组合对胶质、沥青质含量高的稠油作用效果显著, 矿场试验的投资少、见效快、收益高。实践证明, 稠油微生物开采技术值得在新疆油田的稠油开发中加以应用、推广。

关键词: 新疆油田, 油藏, 稠油, 微生物开采, 矿场试验

微生物采油技术, 或细菌采油技术是向油藏中注入微生物或刺激油藏中能生存的微生物来改善油藏地质条件, 提高原油采收率的过程 (即 Microbial Enhanced Oil Recovery, 简称 MEOR)。笔者拟将近年来所做的微生物开采稠油的矿场试验情况在此予以简述, 以期抛砖引玉。

1. 微生物采油研究进展

1926 年, 美国人^[1]最早提出采用微生物提高石油采收率的构想。近 20 年来, 微生物采油技术在美国、西西伯利亚、阿塞拜疆及阿拉伯地区的多个油田取得了很好的效果^[2,3]。目前, 美国 1000 多口井在实施微生物采油, 效果亦很可观^[4,5]。如今, 微生物采油技术在国际上业已形成了以美国学派和俄罗斯学派为代表的两大学术阵营^[6]。

我国对微生物采油的研究起步较晚, 始于 20 世纪 60 年代末^[4]。80 年代以来国内一些科研机构以及大庆、胜利、大港、吉林、辽河、青海、新疆等 10 多个油田都开展了微生物采油技术的室内研究和现场试验, 如 80 年代末中科院微生物所与大庆油田合作的 2 口井的微生物单井吞吐试验, 90 年代中科院微生物所与吉林油田合作的 35 口井的井场试验, 1998 年 5 月西南石油学院与青海油田开展的 13 口井的微生物单井吞吐试验等等, 都收到了一定的效果^[7~11]。近几年来, 先后从美国、加拿大引进微生物产品和微生物采油技术, 加快了我国微生物采油技术的发展^[10]。

纵观微生物采油技术的发展历程^[6~9], 不难发现其具有以下几个特点:

1. 微生物采油技术¹具有运作成本低、施工工艺简便、效果好、见效快、收效时间长、投资回报率高以及不污染地层等优点;
2. 微生物采油的作用机理主要是利用采油菌或其代谢产物通过在油层中释放可溶于原

¹ 本课题得到博士点基金(项目编号: 20040615002)、四川省重点学科建设基金(项目编号: SZD0414)资助

油中的气体、降解原油、乳化原油或改变油层亲水性等来增强原油的流动性，并提高原油采收率；

3. 由于微生物都有一定的生存环境，该技术对油藏地质条件有一定的要求，诸如油层的温度、压力、地层水矿化度、pH、Eh 等等都应处于一个合适的范围，进而要求采油菌种具有一定的筛选标准；

4. 过去的或正在进行的微生物采油技术的应用多是针对高蜡原油（或蜡基原油的，且多是用来开采稀油），矿场试验的目的往往集中于利用微生物脱蜡（降低脂肪烃的碳数）以增加原油流动性来提高采收率，针对富含胶质和沥青质等分子量更大、极性更强组分的稠油，其应用还很有限；

5. 现有技术所采用的采油微生物多为筛选菌种（或外源微生物群，以美国学派为代表）或是本源微生物群（以俄罗斯学派为代表），亦有利用混合菌群的。

2. 研究区稠油油藏概况

克拉玛依油田六、九区（研究区）浅层稠油油藏位于准噶尔盆地西北缘，克拉玛依市以东约 45km 处（图 1）。区域构造位于西北缘克乌断裂上盘超覆尖灭带上，为一由西北向东南缓倾的单斜。截至 2003 年 8 月，浅层稠油油藏投入开发层块 12 个，累积注汽 5216.6 万吨，累积采油 1283.4 万吨，累积油汽比为 0.26，综合含水为 86%。

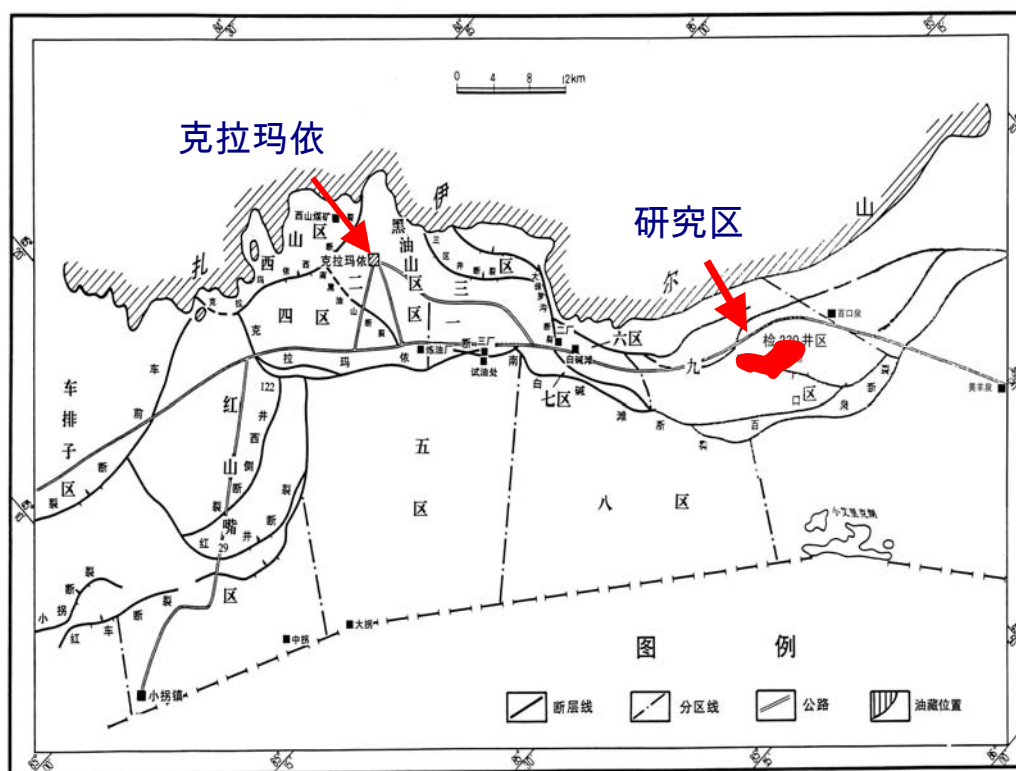


图 1 研究区交通及构造位置简图

2.1 油藏特征

研究区上侏罗统齐古组稠油油藏构造位于克~乌断裂上盘超覆尖灭带上。油层范围内，齐古组底部构造形态基本为由西北向东南缓倾的单斜，地层倾角为 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ ，超覆沉积在石炭系、三叠系、中下侏罗统之上，齐古组油层中部埋深平均为 200m，该区齐古组油藏内部尚未发现断裂。

根据齐古组取芯井的岩性、沉积构造、粒度、电性特征及砂砾岩沉积体的分布形态分析，齐古组沉积环境属于辫状河流相沉积。储层岩性为一套浅灰——灰褐色细砂岩、中粗砂岩、含砾中砂岩及少量砾岩和浅灰及棕红色泥岩组合的正旋回碎屑沉积。该区齐古组分布稳定，沉积厚度东厚西薄，变化在 60~130m 之间，平均 85m。根据齐古组剖面上的岩性组合及沉积旋回特征，纵向上自下而上分为 J_3q^3 、 J_3q^2 、 J_3q^1 三个砂层组， J_3q^2 又可细分为 J_3q^{2-1} 和 J_3q^{2-2} 两个砂层， J_3q^{2-2} 砂层基本控制着全区 90% 的地质储量。

研究区油藏中部原始地层压力平均为 2.1MPa，压力系数平均为 1.05，原始地层温度平均为 20℃，油层基本无自喷能力，油藏类型为岩性圈闭浅层稠油油藏。油藏的主要参数见表 1。

表 1 浅层稠油油藏参数表

项目	内容	项目	内容
倾角	$ES4^{\circ} \sim 9^{\circ}$	有效渗透率	$0.3\mu m^2 \sim 4.0\mu m^2$
油层埋藏深度	160m~600m	含油饱和度	55%~80%
沉积厚度	平均为 100m	原始油层压力	1.8Mpa~4.0Mpa
有效厚度	5m~25m	原始油层温度	$16^{\circ}C \sim 27^{\circ}C$
非均质性系数	0.26~0.67	地面原油密度	平均为 $0.932g/cm^3$
孔隙度	25%~35%	粘度 (20℃)	2000mPa·s~120000mPa·s

2.2 油藏开发方式

克拉玛依六、九区浅层稠油油藏是新疆油田最早投入注蒸汽开发的油田，也是新疆浅层稠油的主要产区，多年来以注蒸汽热采为主。

从 1984 年九₁区注蒸汽热采起至今已陆续开发了九₁、九₂、九₃、九₄、九₅、九₆、九₇₊₈、九₉、六₁、六东等 10 个层块，形成了大规模工业性热采局面。截止 2003 年 6 月，已投入注蒸汽开发面积达 32.2Km²，地质储量 8056 万吨，注蒸汽热采井数 4854 口，年生产原油近 200 万吨，在吞吐开发取得成功的基础上，于 1991 年在全国率先大面积转入蒸汽驱开发，在蒸汽驱开发初期，由于受蒸汽驱认识和工艺技术条件的限制，蒸汽驱生产效果不理想，至 1995 年末，汽驱油汽比只有 0.11，采油速度 1.2%。

3. 研究区稠油特征

齐古组油藏平均地面原油密度为 0.932g/cm^3 ，其它特点如下：粘度高，20℃时平均地面脱气原油粘度为 $10000\text{mPa}\cdot\text{s}$ ；酸值高，平均为 4.2mgKOH/g ；胶质含量高，平均为 14.3%；含蜡量低，平均为 2%；含硫量低，平均 0.2%；凝固点低，为 -6.5°C 到 -25°C ，平均 -19°C 。原油粘温反应敏感，当温度从 20℃ 上升到 50℃ 时，原油粘度可由 $10000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 降到 $800\text{mPa}\cdot\text{s}$ 左右，下降幅度可达 94%。平面上在九₁区中部一带原油粘度较低，平均 $4000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 左右，向东西两侧逐渐增高到 $20000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 以上。

该区经过前期的蒸汽吞吐及蒸汽驱开采，地层原油中部分溶解气及轻组分被产出，地下原油粘度急剧上升。从目前已投产加密井原油样品分析统计，20℃时地面脱气原油粘度平均为 $13000\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，比开采初期原油粘度 $10000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 约升高 $3000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

4. 微生物采油矿场试验及效果分析

表 2 第一次 MEOR 作业前后产能（主要参数）对比表

措施井号	菌液下井时间	累计产油量 (t)	累计工作天数 (d)	平均日产油量 (t/d)	措施前各施工井主要参数				
					生产天数(d)	累计注气 (t)	日均注气 (t/d)	累计产油 (t)	日均产油 (t/d)
97081	2002.11.2	325	46.1	7.049	254	5569	21.925	253	0.996
98725	2002.11.2	253	118.3	2.14	42.4	2217	52.288	129	3.042
98671	2002.11.2	130	67.2	1.935	138.4	1912	13.815	424	3.064
98715	2002.11.2	190	111.2	1.708	55.4	2151	38.827	1	0.018
97121	2002.11.2	30	27	1.111	55.4	8241	148.75	515	9.296
97076	2002.11.2	11	42.7	0.253	163.1	2553	15.653	539	3.305
合 计		939	412.4	14.196	708.7	22643	31.6	1841	2.39

备注：统计时间截至 2003 年 6 月 30 日为止，7 月份产量尚未计入。

新疆油田重油公司所属稠油油藏目前多采用的是蒸汽驱或蒸汽吞吐等开发方式。近年来，稠油油藏已进入了高含水开发阶段，累积汽油比已达到 3.85。考虑到注蒸汽热采的效果和成本，重油公司决定与西南石油学院合作，尝试稠油微生物开采（MEOR）的矿场试验，分别于 2003 年 3 月和 2004 年 4 月开展了 2 次 MEOR 矿场试验，第一次选井 6 口，第二次选井 15 口，试验井分属于九₇、九₈、九₅和九₆区。微生物采油试验采用的采油菌种是混源微生物，试验采取的生产方式为单井吞吐。

为了便于分析 MEOR 的效果，同时便于对比稠油注蒸汽热采和稠油微生物开采两种油藏开发技术的优劣，矿场试验进程中，要求停止注蒸汽或向井中拌热。下面将近两次稠油微生物开采矿场试验的效果做以简介。

第一次 MEOR 矿场试验的时间为 2002 年 11 月~2003 年 3 月。试验结果表明：经过微生物作用，地层中原油粘度大幅度降低，无需注入蒸气或仅需少量注入蒸汽即可进行采油作业。从 2003 年 3 月开井生产至 6 月 30 日，6 口试验井共计产油 939t（表 2）。微生物采油试验吨油成本价为 156.6 元，低于同期的注蒸气采油控制成本价 384.4 元/t。按照 500 元/t 的井口原油价格计，投资回报率为 3.13；若按照每吨原油 1000 元的价格计算，投资回报率更是高达 6.26。

表 3 第二次 MEOR 作业前后产能（主要参数）对比表

措施井号	累积生产情况（截止 04 年 3 月）					措施前	措 施 后					措施后 /措施前 日产能
	注汽 (m³)	产油 (t)	天数 (d)	日产能 (t)	汽/油	日产油 (t/d)	日产能 (t)	生产天数 (d)	总产量 (t)	累计增产 (t)		
96217 [*]	9226	2132	598.2	3.56	4.33	1.8	6.77	106.5	720.72	535	3.76	
96643 [△]	6069	3570	597.8	5.97	1.7	2.7	4.98	89.4	445.42	204	1.84	
951151 [△]	2511	1088	206.1	5.28	2.31	3.9	3.91	102.8	402.42	81	1	
951175	2464	1069	225.1	4.75	2.3	3.1	2.42	86.3	208.88	54	0.78	
951187 [*]	2702	525	160.5	3.27	5.15	3.3	3.56	28.8	102.66	9	1.08	
951196	1985	171	125.8	1.36	11.61	1.8	0.24	102.8	24.4	0	0.13	
97737 [△]	3634	393	648.4	0.61	9.18	0.3	0.44	66.2	28.85	13	1.47	
97740 [△]	7730	930	797.6	1.17	8.31	0.5	1.15	105.9	121.78	85	2.3	
97741	7782	822	770.3	1.07	9.47	0.3	0.18	105.9	19.05	3	0.6	
97743 [△]	7699	2665	799.8	3.33	2.89	0.8	1.31	58.9	77.43	32	1.64	
97762 [△]	9870	1262	488.7	2.58	7.82	1.1	1.47	60.1	88.49	26	1.34	
97763	5165	480	549.5	0.87	10.76	0.8	0.22	56	12.19	0	0.28	
97758	8872	3092	496.2	6.23	2.87	1.8	1.66	109.9	182.66	64	0.92	
97759 [△]	4726	2208	515.1	4.29	2.14	1.8	2.84	76.9	218.58	83	1.58	
小计	80435	20407	6979.1	2.92	3.94	1.71	2.29	1156.4	2653.53	1189	1.34	

备注：1）※示特高效井，系指措施后较 2004 年 3 月以前日产能提高者；
2）△示高效井，系指措施后较措施前（关井前）日产油提高者。

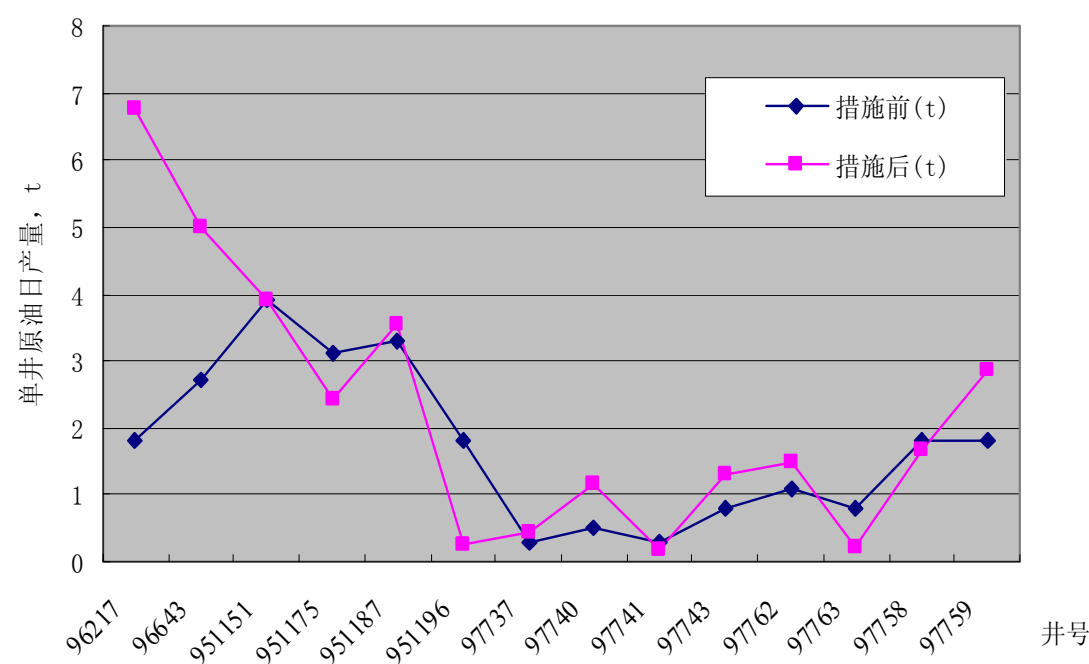


图 2 第二次 MEOR 作业前后单原油日产量对比曲线

第二次 MEOR 矿场试验时间为 2004 年 4 月~2004 年 5 月。从 2004 年 5 月开井生产至 8 月 31 日, 15 口试验井累计产油 2653.53t (较措施前注蒸汽开采的日产能, 累计增产 1189t, 详见表 3, 图 2)。MEOR 试验吨油成本价为 150.74 元, 低于 MEOR 措施前 (2004 年 3 月以前) 注蒸汽采油的总体成本价 197 元/t。按照 500 元/t 的井口原油价格计, 投资回报率为 3.31; 若按照每吨原油 1000 元的价格计算, 投资回报率更是高达 6.63。

根据 MEOR 作业前后对措施井稠油油样的测试, 在采油菌组合的作用下, 除了个别井以外 20℃和 50℃的原油粘度普遍下降, 且二者的变化呈现正相关关系 (图 3、图 4)。在取样测试的几口井中, 以 97762 井和 98725 井的原油粘度下降最为显著, 20℃原油粘度下降幅度分别为 104728mpa·s 和 65587 mpa·s, 50℃原油粘度下降幅度分别为 1634mpa·s 和 1583mpa·s。

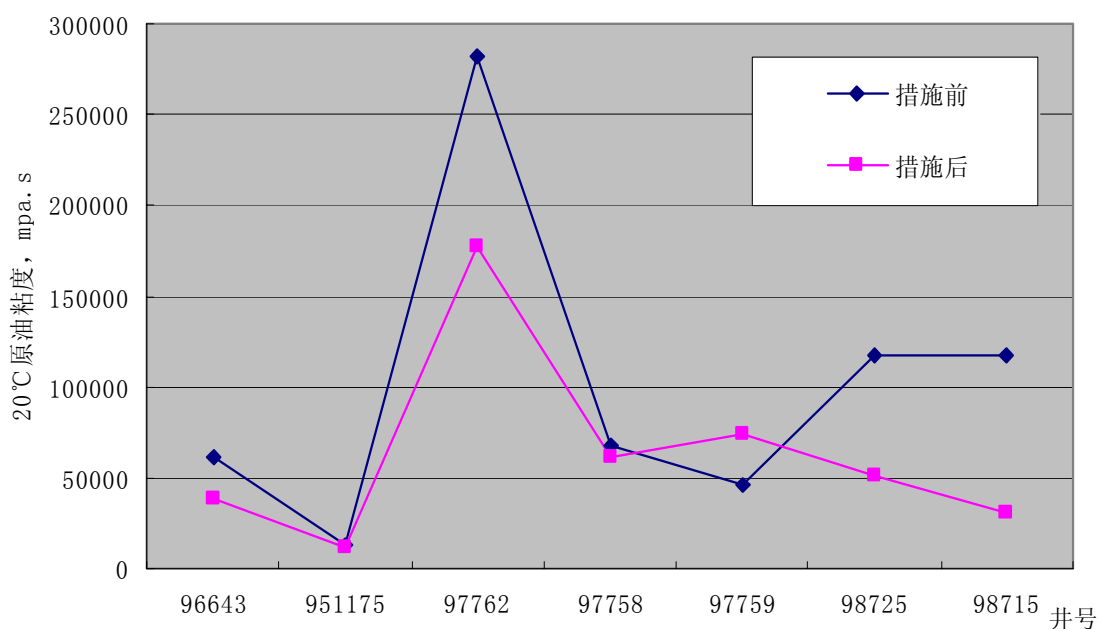


图 3 MEOR 作业前后单井 20℃原油粘度对比曲线

生产实践表明, 微生物对稠油的降解作用显著, 增加了稠油油藏中原油的流动性, 使得稠油油藏开发中后期在不拌热、不注入蒸汽的情况下得以正常生产, 甚至与注蒸汽热采相比能部分试验井还实现了增产。

另外, 试验所用菌液与地层水配伍性好, 24h 无沉淀分层。高浓度菌液注入气测渗透率为 $11.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心, 培养 72h 后, 水测渗透率降低 29.78%, 而气测渗透率 $21.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心, 72h 后, 水测渗透率降低 22.46%, 仅造成了岩心的弱污染。可见, 试验中采油菌对储层物性的影响较小, 对油层的伤害很小。

新疆油田两次 MEOR 矿场试验表明, 西南石油学院微生物组合采油技术提高原油采收率效果显著, 该技术同时具有投资少, 见效快, 安全可靠, 工艺简单等多个优点, 值得在新疆油田乃至全国各大油田的同类油藏开发中尝试、推广。

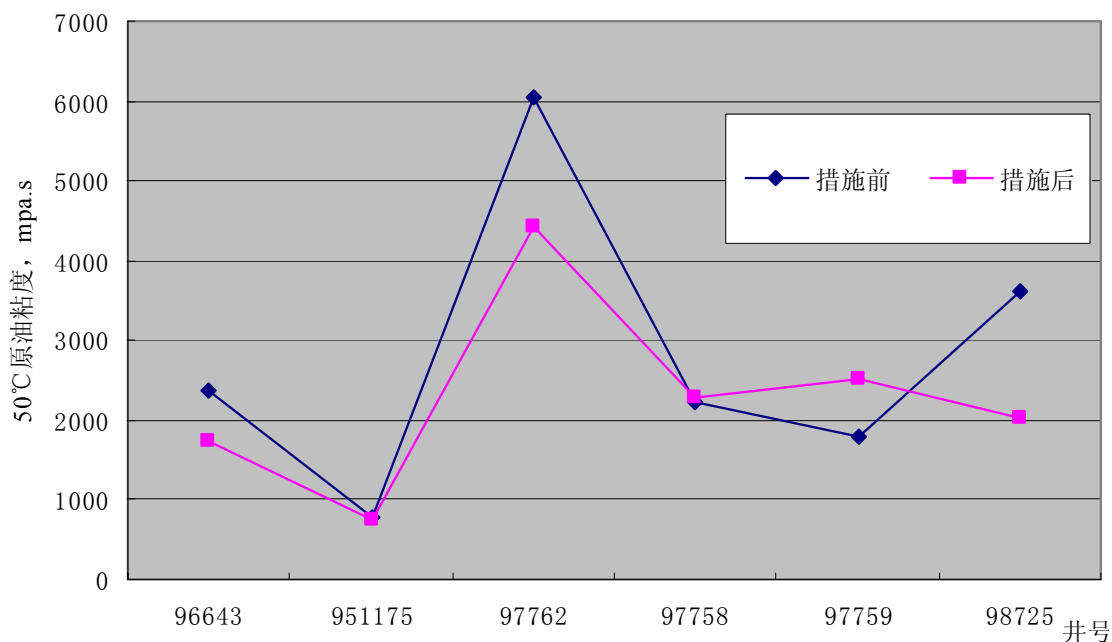


图4 MEOR 作业前后单井 50℃原油粘度对比曲线

5. 结论与建议

1) 筛选、培育的采油微生物组合对新疆油田高含胶质、沥青质的稠油有明显的降解作用,说明微生物不仅以饱和烃为碳源,某些菌种或菌种组合,能够有效的降解稠油中的胶质、沥青质。另外,选育的采油菌对高蜡稠油及常规原油同样有效。

2) 新疆油田的矿场试验的效果表明,与注蒸汽热采相比,稠油微生物开采技术可以在保障产量的前提下,大幅度降低开发成本;同时,也可以避免其他降粘措施可能带来的油田化学剂污染,经济和社会效益都很可观。

3) 稠油微生物单井吞吐开采技术适用范围广,施工工艺简单,投资少,见效快,且安全环保,在新疆油田有广阔的推广应用前景,建议进一步扩大矿场试验规模;

4) 采油微生物对研究区稠油的降解作用原理,抑或采油菌组合对油层的作用机理有待深入研究。

致谢

研究工作得到了西南石油学院罗平亚院士和蓝光志教授的关心和指导,同时得到了新疆油田重油公司有关领导和专家的指导。相关分析测试数据由新疆油田重油公司地质所化验室提供。在此谨表谢意。

参考文献

- [1] Beckman J. W., Action of bacteria on mineral oil [J], Ind. Eng. Chem. News (Ed.4), 1926.3:3-10

- [2] Bryant R S, et al, Review of microbial technology for improving oil recovery [J], SPE Reservoir Engineering, 1989. 2:151-154
- [3] Nelson S. J., Stripper well production increased with MEOR treatment [J], Oil & Gas Journal, 1991, 114-116
- [4] 崔波, 石文平, 戴树高, 等, 高粘度稠油开采方法的现状与研究进展[J], 石油化工技术经济, 2000.6: 5-10, 32
- [5] 洪新, 杨翔华, 唐克, 利用微生物提高采油率[J], 辽宁石油化工大学学报, 2004.1: 43-46
- [6] 王惠, 卢渊, 伊向艺, 国内外微生物采油技术综述[J], 大庆石油地质与开发, 2003.5: 49-52
- [7] 张廷山, 兰光志, 邓莉, 等, 微生物降解稠油及提高采收率实验研究[J], 石油学报, 2001.1: 54-57
- [8] 任明忠, 张廷山, 兰光志, 等, 微生物采油技术在青海油田的应用[J], 西南石油学院学报, 2002.3: 39-42
- [9] 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, 2001.5: 53-57
- [10] 杨承志, 微生物采油的地质基础及筛选标准[J], 石油勘探与开发, 1997.2: 72-76
- [11] 张廷山, 任明忠, 蓝光志, 等, 微生物降解作用对稠油理化性质的影响[J], 西南石油学院学报, 2003.5: 1-4。

Mineral field experiments on microbial enhanced oil recovery of heavy oil ——for Xinjiang Oil Field

Shiwei Huang¹, Tingshan Zhang¹, Jin Huo², Zhaoyong Jiang¹,
Tongwu Dong¹, Haiyan Wu¹

1. Faculty of Resources & Environment, Southwest Petroleum Institute, Chengdu, PRC, 610500;

2. Heavy oil Exploitation Company of Xinjiang Oil Field Branch Corporation, PetroChina,
Karamay, PRC, 843000

Abstract

To improve the recovery ratio of oil and the production benefits of heavy oil reservoirs, Southwest Petroleum Institute and Xinjiang Oil Field cooperated to carry out the mineral field experiments of microbial enhanced oil recovery (MEOR) for heavy oil. In the experiments working bacteria or petroleum bacteria from different places were chose, and the mode of production was individual well injecting-extracting. There were 21 product wells of heavy oil in the two times. Through the influence of working bacteria, the viscosities of heavy oil were decreased greatly. With little or no hot vapor, most test wells had reached for economic productivity. High products / investments ratio had been got in the experiments. According to the results of the experiments, the working bacteria selected can obviously degrade heavy oil rich gum and asphaltene. And the mineral field experiments have many advantages, such as little investment, fast returning, greatly profits and so on. Practices have proved that MEOR of heavy oil is worth applying and generalizing in Xinjiang Oil Field.

Key words: *Xinjiang Oil Field, reservoirs, heavy oil, MEOR, mineral field experiments*

作者简介:

黄世伟: 1979 年生。博士研究生。主要研究方向是石油地质及原油提高采收率。

张廷山: 1961 年生。教授, 博士生导师。主要研究方向是油气地质及石油微生物开采技术。