

油藏物性及采出程度对内源微生物驱油效果的影响

孙刚正¹, 胡婧¹, 刘涛¹, 郭辽原¹, 王小芳², 吴晓玲¹, 曹功泽¹, 汪卫东¹

(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. 中国石化胜利油田分公司河口采油厂, 山东东营 257000)

摘要:油藏物性及采出程度对内源微生物采油技术实施效果存在显著影响, 但该领域一直缺乏系统的室内研究, 内源微生物驱油技术无科学的油藏筛选标准。基于胜利油区孤东51-511区块, 利用室内物理模拟实验定量研究了渗透率、地面原油黏度、采出程度及非均质性级差对内源微生物驱油效果的影响。当渗透率为50~4 000 mD时, 提高采收率先增加后降低, 当渗透率为500 mD时驱油效果最好, 提高采收率达到6.6%;当地面原油黏度为35~5 371 mPa·s时, 随着地面原油黏度的增加, 提高采收率先升高后降低, 当地面原油黏度为1 148 mPa·s时, 提高采收率最高, 达到8.8%;当采出程度为10%~50%时, 随着采出程度的增加, 提高采收率逐渐降低(由12%降低至2%);渗透率级差为2~20时, 随着渗透率级差的增加, 提高采收率逐渐降低(由7.3%降低至3.2%)。基于上述研究, 建立内源微生物驱油技术油藏筛选标准, 从油藏、生物及开发3大类指标明确关键参数的最佳适用范围, 为内源微生物驱油技术油藏筛选提供科学的理论参考, 指导现场实施。

关键词:内源微生物; 渗透率; 黏度; 采出程度; 渗透率级差

中图分类号: TE357.9

文献标识码: A

Effects of reservoir physical properties and recoveries on oil displacement of endogenous microbes

SUN Gangzheng¹, HU Jing¹, LIU Tao¹, GUO Liaoyuan¹, WANG Xiaofang²,

WU Xiaoling¹, CAO Gongze¹, WANG Weidong¹

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

Shandong Province, 257000, China; 2. Hekou Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company,

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

Abstract: Reservoir physical properties and recoveries have a significant impact on the implementation of the endogenous microbial oil displacement technology. However, systematic laboratory research has been lacking in this field, and this technology has been in need of scientific screening criteria of reservoirs. On the basis of Gudong Block 51-511 in Shengli Oilfield, the effects of permeability, surface crude oil viscosity, recovery and heterogeneity on the oil displacement of endogenous microbes were quantitatively studied by physical simulations. When permeability is 50-4 000 mD, the enhanced oil recovery first increases and then decreases. As permeability is 500 mD, the oil displacement effect is the best, and the enhanced oil recovery reaches 6.6%. When the surface crude oil viscosity is within 35-5 371 mPa·s, as the viscosity of crude oil grows, the enhanced oil recovery first rises and then declines. When the surface crude oil viscosity is 1 148 mPa·s, the enhanced oil recovery is the highest, reaching 8.8%. When the recovery is 10%-50%, as it increases, the enhanced oil recovery gradually drops (from 12% to 2%). When the permeability difference is 2-20, the enhanced oil recovery will decline over time (from 7.3% to 3.2%) as the permeability difference rises. Then the screening criteria of reservoirs with endogenous microbial oil displacement technology are established, and the optimal ranges of key parameters are defined from reservoir, biological, and development indicators. This paper can serve as scientific theoretical reference for reservoir screening by endogenous microbial oil displacement and guide the field implementation.

收稿日期: 2020-12-25。

作者简介: 孙刚正(1980—), 男, 山东济南人, 副研究员, 博士, 从事微生物采油技术研究与现场推广工作。E-mail: sungangzheng.slyt@sinopec.com。

通信作者: 胡婧(1980—), 女, 河南许昌人, 副研究员, 博士。E-mail: tomatohu@163.com。

基金项目: 中国石化示范工程项目“微生物驱生化指标监测及其与驱油效率关系研究”(P18087-4)。

Key words: endogenous microorganism; permeability; viscosity; recovery; permeability ratio

内源微生物驱油技术是利用地层已存在的微生物群落,通过注水井向地层注入激活剂,激活其中的有益微生物群落,利用其生长代谢活动及代谢产物与岩石、原油和水的界面相互作用,降低界面张力,改善原油的流动性质,提高原油采收率。内源微生物驱油技术具有油藏适应性广、成本低和现场施工工艺简单等优势,中外现场应用较为广泛,并已取得较好效果^[1-4]。

通过大量的室内及现场研究发现,不同油藏在开展内源微生物驱油后取得的效果差异较大,影响实施效果的主要因素在于不同油藏其物性及开发状况不同,油藏温度^[5]、渗透率^[6]、矿化度^[7]、pH值^[8]、压力^[9]、溶氧浓度、原油性质及开发阶段等关键因素对内源微生物驱油的效果产生明显的影响^[10-11]。针对微生物驱油藏适应性方面的研究,美国在1995年曾对过去十年实施的322个微生物采油技术的项目进行了统计,并对有一定效果的近2000口油井进行研究,建立了专门用于微生物驱油技术的数据库,对比分析增油量与油藏岩性、孔隙度、渗透率、原油密度、油藏温度及含水率对微生物驱油效果的影响^[12]。美国泰坦公司对2012年以来成功实施微生物驱油的试验区块的油藏特征进行研究,结果表明油藏渗透率和含水率是影响微生物驱油效果的主要因素。目前,中外内源微生物驱油油藏筛选标准均从现场试验经验出发,考虑温度、压力、渗透率、原油黏度和矿化度等参数的适应范围,由于现场干扰因素多而复杂,无法明确单一因素对内源微生物驱油效果的影响规律,无法在内源微生物驱油油藏筛选方面给出科学的、有针对性的依据,影响内源微生物驱油效果。

为此,急需开展系统的内源微生物驱油油藏适应性研究,细化内源微生物驱油油藏筛选标准,为内源微生物驱油油藏的选择提供理论依据。笔者通过室内物理模拟实验开展油藏渗透率、原油黏度、采出程度及非均质性对内源微生物驱油效果的量化研究,进一步明确油藏物性及采出程度对内源微生物驱油效果的影响,以期在现场应用区块的筛选及效果评价提供科学的决策依据。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验所用地层水均来自于胜利油区孤东51-

511区块,该区块油藏埋深为1367 m,油藏温度为68℃,渗透率为867 mD,地层水矿化度为9130 mg/L,地面原油黏度为774 mPa·s,采出程度为14.3%,综合含水率为92%。前期利用分子生物学法对该区块的内源微生物种类进行了评价,结果显示,该区块含有种类丰富的内源微生物群落,初始菌浓度为 2.6×10^2 个/mL,其中包含大量与驱油相关的驱油功能菌如地芽孢杆菌、产脂肽菌、嗜烃菌和产甲烷古菌等。基于该区块丰富的内源微生物基础,选择其地层水作为一维物理模拟实验用水。开展一维物理模拟研究前,针对该区块地层水的微生物群落结构特点,在室内开展了内源激活剂筛选实验,得到针对该区块内源微生物的高效激活剂配方:糖蜜、磷酸氢二铵和硝酸钠的质量分数分别为0.5%、0.3%和0.2%。激活后的内源菌浓度最高达 9.6×10^8 个/mL,说明该激活剂可有效激活该区块地层水中的内源微生物群落。

1.2 实验方法

不同渗透率下的内源驱替实验 通过一维物理模拟实验考察不同渗透率条件下内源微生物的驱替效果。岩心管尺寸为 $\Phi 38 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$,具体岩心参数如表1。一维物理模拟实验步骤主要包括:所有岩心管按实验设计的渗透率填砂后依次进行抽真空、饱和地层水、饱和原油和一次水驱,一次水驱后的采出程度均达到30%,含水率约为90%;一次水驱后注入0.3 PV室内筛选的激活剂,注入后关闭岩心管两端的夹持器在烘箱内静态培养15 d;培养结束后进行后续水驱,注入量为3 PV,驱替过程中监测产出端的油、水、液变化,计算出不同渗透率下的内源微生物提高采收率。每组渗透率岩心设置同样的空白岩心,不注激活剂持续水驱。实验温度为孤东51-511区块油藏温度。

不同地面原油黏度下的内源驱替实验 筛选胜利油区10个不同地面原油黏度的区块,利用室内一维物理模拟实验考察地面原油黏度对内源微生物驱油效果的影响。实验筛选的区块包括东辛永102、营12、营8、辛68、孤岛中二南、南区馆1+2、孤东51-511、现河草4沙四、河口罗801及纯梁正南高26,其地面原油黏度分别为:5371,4713,3986,2050,3126,1148,774,324,105和35 mPa·s。不同地面原油黏度的物理模拟岩心参数见表2。岩心管填砂后抽真空饱和孤东51-511区块的地层水,然后向每根岩心饱和不同黏度的原油,封闭岩心两端的

表1 不同渗透率物理模拟岩心参数
Table1 Core parameters with different permeability in physical simulations

岩心编号	气测渗透率(mD)	孔隙体积(mL)	饱和油量(mL)	原始含油饱和度(%)	渗透率(mD)	孔隙度	孔喉半径(μm)
ST-1	50	128	106	82.81	50	0.20	1.41
ST-2	100	178	156	87.64	100	0.23	1.87
ST-3	500	205	185	90.24	500	0.24	4.08
ST-4	1 000	244	222	90.98	1 000	0.27	5.44
ST-5	1 500	243	219	90.12	1 500	0.29	6.43
ST-6	2 000	235	216	91.91	2 000	0.30	7.30
ST-7	3 000	259	222	85.71	3 000	0.31	8.81
ST-8	4 000	271	237	87.45	4 000	0.33	9.85

夹持器,在油藏温度下老化7 d;进行一次水驱至出口含水率达到90%。注入0.3 PV的激活剂溶液,在油藏温度为68℃条件下封闭恒温培养15 d后进行后续水驱,后续水驱至含水率达到98%;平行设置一根不注激活剂的空白岩心,直接进行水驱,计算不同地面原油黏度下的内源微生物提高采收率。

表2 不同地面原油黏度物理模拟岩心参数
Table2 Core parameters with different crude oil viscosity in physical simulations

岩心编号	原油黏度(mPa·s)	气测渗透率(mD)	孔隙体积(mL)	饱和油量(mL)	原始含油饱和度(%)
ND-1	5 371	850	212	188	88.7
ND-2	4 713	880	235	210	89.4
ND-3	3 986	910	226	205	90.7
ND-4	2 050	820	210	198	94.3
ND-5	3 126	870	225	195	86.7
ND-6	1 148	820	217	190	87.6
ND-7	774	800	220	192	87.3
ND-8	324	860	232	210	90.5
ND-9	105	830	215	189	87.8
ND-10	35	890	242	220	90.9

不同采出程度下的内源驱替实验 利用物理模拟实验考察采出程度对内源微生物驱油效果的影响,设置6组岩心,渗透率均约为1 000 mD,其中第1组为空白岩心,不同采出程度物理模拟岩心参数见表3。所有岩心抽真空后饱和孤东51-511区块的地层水,计算每根岩心的孔隙体积,饱和研究区块的脱水脱气原油,空白岩心一次水驱直至出口的含水率达到98%为止,其他5根岩心一次水驱控制采出程度分别达到10%,20%,30%,40%和50%,然后注入0.3 PV激活剂溶液,封闭培养15 d。培养结束后进行后续水驱,后续水驱至采出液含水率达到98%,计算不同采出程度下的内源微生物提高采收率。

表3 不同采出程度物理模拟岩心参数
Table3 Core parameters with different recoveries in physical simulations

岩心编号	气测渗透率(mD)	孔隙体积(mL)	孔隙度	原始含油饱和度(%)
空白	920	212	0.31	85.8
511-1	850	215	0.31	82.8
511-2	910	206	0.30	90.8
511-3	890	203	0.29	91.1
511-4	950	199	0.29	90.5
511-5	980	196	0.28	90.8

不同非均质性下的内源驱替实验 利用双管岩心开展不同渗透率级差下的内源微生物驱油实验,5组内源微生物驱油双管物理模拟岩心渗透率级差分别为2,5,10,15和20,具体物理模拟岩心参数如表4所示。除了实验组,每种渗透率级差还设置了空白实验。实验过程与物理模拟实验一致,饱和水、饱和油、一次水驱,双管岩心综合采出程度达

表4 不同非均质性物理模拟岩心参数
Table4 Core parameters with different heterogeneity in physical simulations

实验编号	渗透率级差	岩心编号	渗透率(mD)	孔隙体积(mL)	原始含油量(mL)	原始含油饱和度(%)	平均含油饱和度(%)
JC-1	2	D ₁	500	216	200	92.6	93.8
		G ₁	1 000	223	212	95.1	
JC-2	5	D ₂	500	199	185	93.0	94.0
		G ₂	2 500	235	223	94.9	
JC-3	10	D ₃	500	204	190	93.1	93.0
		G ₃	5 000	253	235	92.9	
JC-4	15	D ₄	500	220	205	93.2	93.4
		G ₄	7 500	265	248	93.6	
JC-5	20	D ₅	500	210	196	93.3	92.8
		G ₅	10 000	276	255	92.4	

到30%，注入0.3 PV的激活剂溶液，封闭培养15 d，培养结束后进行后续水驱，后续水驱至采出液含水率达到98%，计算不同渗透率级差下的内源微生物提高采收率。

2 实验结果与分析

2.1 内源微生物驱油效果的影响因素

2.1.1 油藏渗透率

油藏渗透率对内源微生物渗流特征影响较大，美国能源部公布的微生物技术适应标准中提出该技术需应用在渗透率大于50 mD的油藏中，渗透率超低不利于微生物在油藏中的运移及生长代谢^[12-13]。2006年杨鹏等开展了渗透率为0.37~74.5 mD条件下的微生物运移及驱油效果实验，研究发现，渗透率低于18.8 mD时，注入的外源微生物提高的采收率低于4.22%，其原因主要在于微生物的大小与岩心的平均孔喉半径不匹配^[14]。2013年陈晔等开展了岩心渗透率为39~500 mD条件下的内源微生物驱油效果实验，研究结果表明，在该渗透率范围内，随着岩心渗透率的增加，微生物提高采收率从0.71%升至5.42%，说明高渗透率有利于内源微生物驱油^[15]。

研究进一步扩大岩心渗透率范围的上限，考察渗透率为50~4 000 mD时的内源微生物驱油效果。从图1可以看出，渗透率为50~1 000 mD时，随着渗透率的增加，内源微生物逐渐提高，其中渗透率为500 mD时的内源微生物驱油效果最好，提高采收率达到6.6%，含水率最大降幅达到5.13%。此外，与之前研究成果不同的是，渗透率超过1 000 mD后，内源微生物提高采收率并没有继续升高而是呈明显

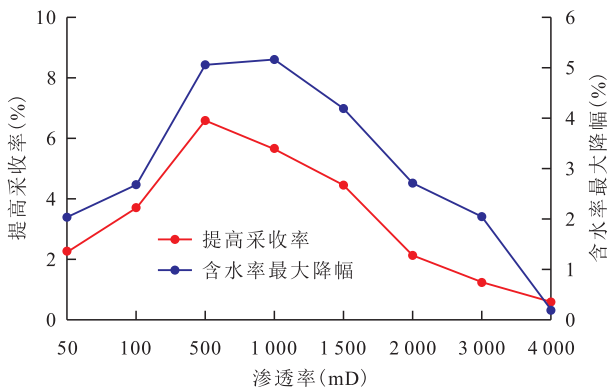


图1 不同渗透率下的内源微生物提高采收率及含水率降幅规律

Fig.1 Enhanced oil recoveries and maximum decreases in water cut of endogenous microbial oil displacement at different permeability

的下降趋势。内源微生物在渗透率小于100 mD和渗透率大于1 500 mD时驱油效果不明显，提高采收率低于4%。

微生物本身具有一定体积(细菌长度为1~5 μm)，不同渗透率岩心具有不同的孔喉半径(表1)，渗透率为1 000 mD时，岩心孔喉半径与细菌最大长度相当，当岩心渗透率降低时，孔喉半径减小，微生物受到的过滤和吸附滞留阻力增大，微生物在岩心中的运移能力降低，但在喉道压力的作用下，一部分尺寸较小的微生物也可通过形变在喉道中运移，进入到岩心内部与多孔介质中的原油发生相互作用^[16-17]，所以微生物可以耐受一定程度的低渗透率。渗透率过高时，孔喉半径大于菌体自身长度，激活后的菌体被后续注入水快速驱出，无法在岩心中滞留，影响了微生物与原油的相互作用，提高采收率明显降低。实验结果证实，在物理模拟油藏条件下，内源微生物驱油存在一定的渗透率适应性范围，渗透率过高或过低都不利于微生物驱油，渗透率为100~1 500 mD时具有较好的驱油效果。

2.1.2 地面原油黏度

内源微生物驱油的主要机理是通过微生物生长代谢产生的生物类表面活性剂、生物气及嗜烃作用降低地面原油黏度来提高采收率。利用一维物理模拟实验考察不同地面原油黏度下内源微生物的驱油效果。从图2可以看出，扣除空白水驱提高采收率，地面原油黏度为35 mPa·s时，内源微生物提高采收率仅为2.5%，其原因为空白水驱提高采收率程度高，内源微生物驱替效果有限。随着地面原油黏度的增加，一次水驱效果逐渐变差，内源微生物通过乳化降黏等作用进一步提高采收率。地面

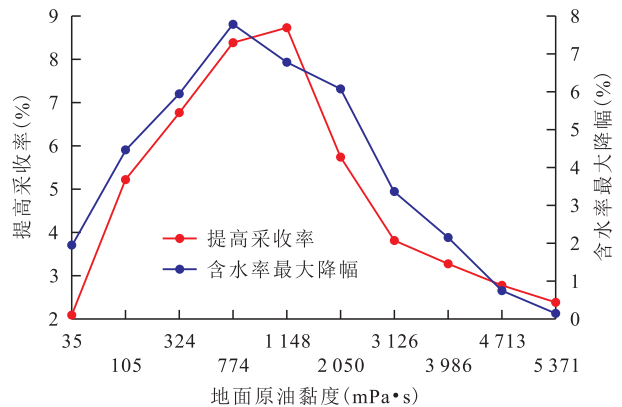


图2 不同地面原油黏度下内源微生物提高采收率及含水率最大降幅规律

Fig.2 Enhanced oil recoveries and maximum decreases in water cut of endogenous microbial oil displacement at different crude oil viscosity

原油黏度为1 148 mPa·s时内源微生物提高采收率程度最高,为8.8%。地面原油黏度大于1 148 mPa·s后,内源微生物驱油效果逐渐变差。

沥青质和胶质是造成稠油高黏度的主要原因,除了微生物代谢产物对原油的乳化作用外,微生物还可通过沥青质和胶质的降解改善原油流动性,从而提高原油采收率^[18-19]。通过分析地面原油黏度为1 148~5 371mPa·s时,原油四组分在内源微生物作用前后的变化(表5)发现,地面原油黏度为1 148 mPa·s时,沥青质和胶质初始含量为35.89%,内源微生物作用后含量降低了9.51%,随着地面原油黏度的升高,原油组分中的沥青质和胶质的含量逐渐增大,内源微生物对其的降解能力减弱。其原因为,地面原油黏度过大,微生物对原油的乳化作用会相应降低,微生物无法有效地摄取原油,从而导致降解作用减弱。研究表明,内源微生物对地面原油黏度小于3 000 mPa·s,沥青质和胶质含量小于40%的原油有较好的驱替效果。

表5 微生物作用前后原油四组分的变化

Table5 Changes in four components of crude oil before and after endogenous microbial oil displacement

50 °C时地面原油黏度(mPa·s)	实验组	原油四组分含量(%)				沥青质和胶质含量降低的值(%)
		沥青质	胶质	芳香烃	饱和烃	
1 148	空白	8.30	27.59	28.12	33.91	
	微生物	5.68	20.70	30.15	38.46	9.51
2 050	空白	10.94	32.28	24.93	23.76	
	微生物	9.45	31.08	25.76	25.12	2.69
3 126	空白	11.04	34.28	22.93	27.76	
	微生物	10.45	32.78	23.76	29.01	2.09
4 713	空白	12.87	33.17	25.16	28.80	
	微生物	12.65	32.18	26.13	29.04	1.21
5 371	空白	13.67	33.31	29.89	13.86	
	微生物	13.49	33.22	29.41	14.84	0.27

2.1.3 采出程度

通过一维物理模拟实验评价不同采出程度下的内源微生物驱油效果,从图3和表6可以看出,随着采出程度的增加,内源微生物提高采收率及含水率最大降幅都呈明显的降低趋势。采出程度为10%~40%时,内源微生物驱提高采收率为6%~12%,含水率最大降幅大于4%;采出程度为50%时,含水率最大降幅仅为1.2%,内源微生物提高采收率仅为3.3%。

水驱过程中,随着采出程度的增加,多孔介质中的残余油逐渐减少,逐渐形成水流优势通道,后

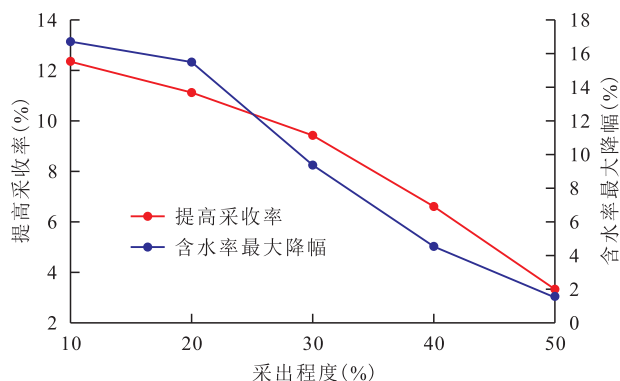


图3 不同采出程度下内源微生物提高采收率及含水率最大降幅规律

Fig.3 Enhanced oil recoveries and maximum decreases in water cut of endogenous microbial oil displacement at different recoveries

表6 不同采出程度下的内源微生物驱替效果

Table6 Effect of endogenous microbial oil displacement at different recoveries

岩心编号	采出程度(%)	综合含水率(%)	激活剂注入量(PV)	最终采出程度(%)	提高采收率(%)
CC-1	10	10.6	0.3	69	12
CC-2	20	63.0	0.3	68	11
CC-3	30	88.0	0.3	66	9
CC-4	40	94.1	0.3	62	5
CC-5	50	96.5	0.3	59	2
空白				57	

期进行内源微生物驱油时,由于微生物自身尺寸数量级远大于水分子,所以激活的微生物不易接触到水无法波及的区域,因此水驱后微生物驱油效果随采出程度的升高而降低^[15,20]。同时,有研究发现随着水驱油藏采出程度的不断提高,原油中的轻质组分在水洗作用下被优先采出,低相对分子质量的正构烷烃逐渐减少^[11]。非烃沥青质和芳烃含量相对增加,原油的轻、重比值呈降低趋势,原油平均分子量增大,地面原油黏度升高,原油密度增加,原油组分的变化也会明显影响微生物的生长特性和作用于原油的能力^[10,21]。实验结果表明,应在采出程度小于40%时开展内源微生物驱油现场应用,可以取得较好的实施效果。

2.1.4 非均质性

通常情况下,油藏是具有一定孔隙度和渗透率的多孔介质,其不仅存在渗透率的差异,而且存在大量的裂缝^[22],油藏在注水开发后,会形成更为明显的优势通道导致油藏的非均质性加剧。内源微生物驱油通常在注水开发后期实施,注入的大部分激活剂溶液会优先进入高渗透率区域或优势通道,影响整个油藏的内源微生物驱油效果,所以非均质

性是影响内源微生物驱油技术在油藏应用效果的主要因素^[23-24]。胜利油区曾在孤岛油田中一区馆3块实施内源微生物驱油技术,该区块非均质性较严重,渗透率变异系数为0.538,大孔道发育,水线推进速度过快,实施微生物驱油后仅4 d即可从生产井检测出激活剂组分,由于激活剂在地层中无充足的时间发挥其作用便被采出,影响了内源微生物的驱油效果^[25]。内源微生物驱油技术只能在一定的渗透率级差范围内,通过菌体的生长繁殖及产生的代谢产物如生物多糖、生物气等对大孔道产生一定的封堵和调剖作用,改善油藏的非均质性^[26]。目前内源微生物对油藏非均质性的耐受范围未开展过相关量化的研究,本研究通过双管并联岩心实验考察了岩心渗透率级差为2~20的内源微生物驱油效果,从表7可以看出,随着岩心渗透率级差的增加,内源微生物驱油效果逐渐降低,渗透率级差为2~10的微生物提高采收率大于6%,说明在该范围内,微生物可在一定程度上改善油藏的非均质性,后续水

表7 不同渗透率级差下的内源微生物驱替效果
Table7 Effect of endogenous microbial oil displacement at permeability ratios

实验 编号	渗透率 级差	0.3 PV 激 活剂注入 量(mL)	提高采收率(%)				
			一次 水驱	后续 水驱	综合	空白 岩心	微生物
JC-1	2	132	22.5	17.7	15.6	8.3	7.3
			47.0	13.5			
JC-2	5	130	17.0	16.3	13.0	6.5	6.5
			48.7	11.0			
JC-3	10	137	16.1	12.7	11.3	5.3	6.0
			50.3	10.7			
JC-4	15	146	12.0	0	8.7	5.2	3.5
			54.8	16.4			
JC-5	20	148	10.1	0	8.0	4.8	3.2
			54.5	18.0			

驱低渗透率岩心的提高采收率维持在15%~17%。渗透率级差达到15后,低渗透率岩心后续水驱提高采收率降为0,激活组分无法进入低渗透率岩心,非均质性无明显改善。从研究结果可以看出,该区块实施内源微生物驱油可在渗透率级差小于10以内取得较好的应用效果。

2.2 内源微生物驱油技术油藏筛选标准

中外其他研究机构及不同油田针对内源微生物驱油技术也制定了油藏筛选标准,但这些标准只涉及油藏物性参数,指标的取值也多以现场经验总结为主,存在指标片面和缺乏实验数据支撑^[27-28]等问题。依据上述标准,不同油藏实施内源微生物驱油技术的效果存在较大差异,缺乏科学的油藏筛选标准是制约内源微生物驱油现场大规模推广的瓶颈问题。本研究基于系统的物理模拟实验结果,明确了渗透率、地面原油黏度、采出程度及非均质性对内源微生物驱油效果的影响,在此基础上,结合胜利油区近10年开展的微生物驱油现场试验经验,重新制定了内源微生物驱区区块筛选标准(表8),内源微生物驱油技术适合温度低于95℃,地面原油黏度小于3 000 mPa·s,胶质和沥青质含量小于40%,油藏渗透率为100~1 500 mD,非均质性渗透率级差小于10的油藏,是决定能否实施内源微生物驱油技术的基本条件;满足油藏条件外,目标油藏还需具备一定的物质基础,油藏初始菌浓需大于10³个/mL时通过激活剂的注入才能实现油藏内源微生物的高效激活,除此,油藏采出程度需低于40%,有一定的剩余油潜力时实施内源微生物驱油可取得较好的效果。

3 结论

利用室内一维物理模拟实验系统研究了渗透

表8 内源微生物驱油藏筛选标准
Table8 Screening criteria of reservoirs with endogenous microbial oil displacement

指标类型	因素	指标	影响作用
油藏指标	油藏温度(℃)	< 95	能否实施的基本条件
	地面原油黏度(mPa·s)	< 3 000	
	胶质沥青质总含量(%)	< 40	
	矿化度(mg/L)	< 150 000	
	油藏渗透率(mD)	100 ~ 1 500	
	非均质性(渗透率级差)	< 10	
生物指标	实施前产出液菌浓(个/mL)	> 10 ³	决定实施效果的物质基础
开发指标	采出程度(%)	< 40	影响实施效果的重要因素

率、地面原油黏度、渗透率级差及采出程度对内源微生物驱油效果的影响,并在实验基础上结合胜利油区现场实施经验制定了内源微生物驱油油藏筛选标准,从油藏、生物及开发等方面给出内源微生物驱油技术油藏选区的关键指标及其适用范围,完善了现有只以油藏物性参数为主的内源微生物驱油技术油藏筛选标准,为该技术的油藏筛选提供科学的理论依据,提高现场实施有效率。下一步将针对超出最适范围的油藏,开展复合工艺技术研究,通过外源菌、生物代谢产物、压裂、化学驱、CO₂驱等技术的复合,进一步拓展内源微生物采油技术的油藏适应性,提高原油采收率。

参考文献

- [1] 刘岩.胜利油田沾3内源微生物驱油技术研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.
LIU Yan.Research of indigenous microbial flooding technology in Zhan3 Block of Shengli Oilfield[D].Qingdao:Ocean University of China,2012.
- [2] 曹功泽,巴燕,刘涛,等.沾3区块内源微生物驱油现场试验[J].特种油气藏,2014,21(1):145-147.
CAO Gongze,BA Yan,LIU Tao,et al.Field pilot test of indigenous microbial flooding in Block Zhan-3[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2014,21(1):145-147.
- [3] 任国领,张虹,乐建君,等.大庆油田内源微生物驱油矿场试验效果[J].大庆石油地质与开发,2016,35(2):97-100.
REN Guoling,ZHANG Hong,LE Jianjun,et al.Field test effects of the endogenous microbial flooding in Daqing Oilfield[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2016,35(2):97-100.
- [4] 陈爱华,吕秀荣,于娟,等.油田内源微生物驱油矿场试验[J].新疆石油天然气,2012,8(4):64-67.
CHEN Aihua,LÜ Xiurong,YU Juan,et al.Exploration on endogenous microorganism oil-displacing in oilfield[J].Xinjiang Oil & Gas,2012,8(4):64-67.
- [5] 宋智勇,郭辽原,袁书文,等.高温油藏内源微生物的堵调及种群分布[J].石油学报,2010,31(6):975-979.
SONG Zhiyong,GUO Liaoyuan,YUAN Shuwen,et al.Microbial plugging and community distribution of indigenous thermophilic microbes in high-temperature oil reservoirs[J].Acta Petrolei Sinica,2010,31(6):975-979.
- [6] 包木太,袁书文,李希明,等.多孔介质渗透率对油藏微生物生长代谢影响[J].深圳大学学报:理工版,2011,28(1):35-40.
BAO Mutai,YUAN Shuwen,LI Ximing,et al.Effects of permeability of porous medium on the growth and metabolism of microorganism in reservoir[J].Journal of Shenzhen University:Science & Engineering,2011,28(1):35-40.
- [7] 王俊,黄立信,俞理.花土沟高矿化度油藏内源微生物提高采收率实验研究[J].科技导报,2011,29(3):26-28.
WANG Jun,HUANG Lixin,YU Li.Laboratory study of enhancing oil recovery rate by indigenous microorganism in hyper-salinity reservoir[J].Science & Technology Review,2011,29(3):26-28.
- [8] 汪卫东,宋永亨,陈勇.微生物采油技术与油田化学剂[J].油田化学,2002,19(3):293-296.
WANG Weidong,SONG Yongting,CHEN Yong.Microbial enhanced oil recovery and oilfield chemicals[J].Oilfield Chemistry,2002,19(3):293-296.
- [9] 包木太,王兵,陈庆国,等.不同压力条件下油藏内源细菌群落激活过程中变性梯度凝胶电泳分析[J].微生物学报,2009,49(4):536-539.
BAO Mutai,WANG Bing,CHEN Qingguo,et al.Denature gradient gel electrophoresis of stratal bacteria activation in oilfield under different pressure conditions[J].Acta Microbiologica Sinica,2009,49(4):536-539.
- [10] 刘保磊,俞理,黄立信,等.不同采出程度下微生物采油效果分析[J].科技导报,2010,28(15):67-70.
LIU Baolei,YU Li,HUANG Lixin,et al.Performance of microbial enhanced oil recovery under different recovery percentages of reserves[J].Science & Technology Review,2010,28(15):67-70.
- [11] 刘晓艳,李宜强,冯子辉,等.不同采出程度下石油组分变化特征[J].沉积学报,2000,18(2):324-326.
LIU Xiaoyan,LI Yiqiang,FENG Zihui,et al.The change of crude oil components under different production degrees[J].Acta Sedimentologica Sinica,2000,18(2):324-326.
- [12] 汪卫东,汪竹,耿雪丽,等.美国微生物采油技术现场应用效果分析[J].油气地质与采收率,2002,9(6):75-76.
WANG Weidong,WANG Zhu,GENG Xueli,et al.Effect analysis on field application of microbial enhanced oil recovery technique in USA[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2002,9(6):75-76.
- [13] 郭省学,刘涛,郭辽原,等.岩心渗透率对微生物驱油效果及生长分布的影响[J].油田化学,2018,35(1):131-134,155.
GUO Xingxue,LIU Tao,GUO Liaoyuan,et al.Oil displacement effect and growth distribution of microbial in cores with different permeability[J].Oilfield Chemistry,2018,35(1):131-134,155.
- [14] 杨鹏,黄立信,俞理.低渗透油藏微生物运移能力研究[J].油气地质与采收率,2006,13(2):85-87.
YANG Peng,HUANG Lixin,YU Li.Study on the capacity of microbial migration in the low permeability oil reservoir[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2006,13(2):85-87.
- [15] 陈晔,董汉平,汪玉琴,等.油藏渗透率与水淹程度对微生物驱油效果的影响[J].新疆石油地质,2013,34(6):689-692.
CHEN Ye,DONG Hanping,WANG Yuqin,et al.The effect of reservoir permeability and watered-out severity on microbial enhanced oil recovery[J].Xinjiang Petroleum Geology,2013,34(6):689-692.
- [16] 雷光伦,李希明,陈月明,等.微生物在油层中的运移能力及规律[J].石油勘探与开发,2001,28(5):75-78.
LEI Guanglun,LI Ximing,CHEN Yueming,et al.The migration ability and rule of microbial in reservoir[J].Petroleum Exploration and Development,2001,28(5):75-78.
- [17] 毕永强,俞理,修建龙,等.采油微生物在多孔介质中的迁移滞留机制[J].石油学报,2017,38(1):91-98.

- BI Yongqiang, YU Li, XIU Jianlong, et al. Migration and retention mechanism of microorganisms for oil recovery in porous media[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(1):91-98.
- [18] 武海燕. 微生物降解特稠油中胶质、沥青质的室内研究及矿场试验分析[D]. 成都: 西南石油大学, 2005.
- WU Haiyan. Laboratory study and field test analysis of colloid and asphaltene in extra-heavy oil degraded by bacteria[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2005.
- [19] 王春明, 李大平, 刘世贵. 稠油开采微生物的生理生化特征及其对原油特性的影响[J]. *石油学报*, 2007, 28(5):89-92.
- WANG Chunming, LI Daping, LIU Shigui. Effects of biophysiological and biochemical characteristics of a strain of microbacterium sp. on properties of thickened oil[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(5):89-92.
- [20] 吴晓玲, 李越, 曹功泽, 等. 采出程度对内源微生物驱油效果的影响研究[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2018, 33(4):82-85.
- WU Xiaoling, LI Yue, CAO Gongze, et al. Influence of recovery degree on indigenous microbial displacement effect[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science*, 2018, 33(4):82-85.
- [21] 陈祖林, 朱扬明, 陈奇. 油层不同开采时期原油组分变化特征[J]. *沉积学报*, 2002, 20(1):169-173.
- CHEN Zulin, ZHU Yangming, CHEN Qi. The change of crude oil components in different production stages[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(1):169-173.
- [22] 韩建华, 李占省, 巨登峰, 等. 提高微生物驱油效果的物模试验研究[J]. *钻采工艺*, 2003, 26(6):86-88.
- HAN Jianhua, LI Zhansheng, JU Dengfeng, et al. The research on physical analog testing for improving microbial oil displacement efficiency[J]. *Drilling & Production Technology*, 2003, 26(6):86-88.
- [23] 张相春, 孙卫, 王德玉, 等. 低渗透油田微生物驱油规律及其影响因素[J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 2014, 44(5):801-807.
- ZHANG Xiangchun, SUN Wei, WANG Deyu, et al. Displacing law and influencing factors of MEOR in low-permeability oilfields[J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2014, 44(5):801-807.
- [24] 夏小雪, 朱维耀, 李娟, 等. 油藏内源微生物生长代谢及驱油特性研究[J]. *石油天然气学报*, 2014, 36(1):122-126.
- XIA Xiaoxue, ZHU Weiyao, LI Juan, et al. Reservoir indigenous microorganisms growth metabolism and its oil displacement characteristics[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2014, 36(1):122-126.
- [25] 孙臻敬. 胜利油田微生物驱油现场实践及分析[J]. *石油天然气学报*, 2014, 36(2):149-152.
- SUN Sangdun. Field practice and analysis of MEOR in Shengli Oilfield[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2014, 36(2):149-152.
- [26] 张彬, 王凯, 张鹏, 等. 微生物驱油技术在ZJ2延9油藏中的应用及效果评价[J]. *石油化工应用*, 2011, 30(5):52-55, 77.
- ZHANG Bin, WANG Kai, ZHANG Peng, et al. Microbial oil recovery technology in ZJ2 Yan9 reservoir of application and evaluation[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2011, 30(5):52-55, 77.
- [27] 杨承志, 楼诸红. 微生物采油的地质基础及筛选标准[J]. *石油勘探与开发*, 1997, 24(2):69-72, 101.
- YANG Chengzhi, LOU Zhuhong. Screening standards and geological bases for microbial enhanced oil recovery[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1997, 24(2):69-72, 101.
- [28] 刘静竹. 微生物采油的地质基础及筛选标准应用分析[J]. *化学工程与装备*, 2017, 9(9):163-164.
- LIU Jingzhu. Geological basis of microbial oil recovery and application of screening criteria[J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2017, 9(9):163-164.

编辑 王星