中高温油藏高效驱油微生物SZ2研究与应用

戴振华1，郭继香1\*，孙刚正2，巴燕2，刘涛2，吴小川3

(1.中国石油大学（北京）提高采收率研究院,北京 102249;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；3.中国石化武汉分公司,湖北 武汉 430080)

**摘要：**针对胜利油田中高温油藏微生物驱油技术中培育高效驱油微生物问题，利用葡萄糖、蛋白胨、酵母粉、磷酸氢二钾、氯化钠培育出了高效驱油微生物SZ2。利用高温高压流变仪、棒状薄层色谱分析仪、旋转滴界面张力仪和动态接触角测量仪分析了微生物SZ2对原油黏度、族组成、油水界面性质、乳化性能、润湿性能的影响，并对微生物趋界面效应进行了考察。结果表明，微生物SZ2在60℃时使原油黏度由1197mPa·s降低至432.7mPa·s，降低了63.9%，常温（20℃）下使胶质、沥青质质量分数由70.34%下降至67.16%，下降了4.5%，并能够明显改善油水界面性质，55℃下，对比去离子水，使得地层水（矿化度：10220 mg/L）-稠油（7945 mPa·s）界面张力由40.96mN/m降低至16.72mN/m，降低了59.18%，使接触角由中性润湿81.00°下降至亲水性20.28°，60℃下和原油作用10d即可使原油完全分散，多方面性能优于胜利油田现有驱油微生物S3，在胜利油田沾3区块现场实验期间，使油井综合含水率由96.1%降为89.1%，累计增产3288吨，效果较好，应用前景广阔。

**关键词：**驱油微生物；降黏；界面性质；乳化性能；接触角；趋界面效应；提高采收率

**中图分类号：**TE357 文献标识码：A

**Research and Application of High Efficiency Oil Displacement Microorganism SZ2 in Medium and High Temperature Reservoirs**

Dai Zhen-hua1, Guo Ji-xiang1\*, Sun Gang-zheng2, Ba Yan2, Liu Tao2, Wu Xiao-chuan3

(1*. Enhanced Oil Recovery Research Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;*2*. Petroleum Engineering Technology Research Institute of Shengli Oilfield Company, Dongying 257000, Shandong, China;3.* *Sinopec Wuhan Company, Wuhan 430080, Hubei, China*)

**Abstract：**In order to solve the problem of microbial flooding in Shengli Oil Field, the efficient microbial SZ2 was cultivated by using glucose, peptone, yeast extract, dipotassium hydrogen phosphate and sodium chloride. The effects of microbial SZ2 on the viscosity, composition, oil-water interface properties, emulsifying properties and wettability of crude oil were analyzed by high temperature and high pressure rheometer, bar thin layer chromatograph, spinning drop interfacial tensiometer and dynamic contact angle measuring instrument, and the interface effect of microorganisms was studied. The results showed that the microbial SZ2 reduced the viscosity of crude oil from 1197mPa·s to 432.7mPa·s at 60℃, and decreased 63.9 %, and the mass fraction of glial and asphaltene decreased from 70.34% to 67.16%, decreased by 4.5% under normal temperature(20℃). The interfacial tension of the formation water (salinity: 10220mg/L) and heavy oil (7945mPa·s) was reduced from 40.96mN/m to 16.72mN/m, which was 59.18% lower than that of deionized water at 55℃. The contact angle decreased from 81° to neutral 20.28° at 60°C and crude oil was completely dispersed for 10 days. The performance of the crude oil was better than that of Shengli Oilfield. In Shengli Oilfield, during the field test, the comprehensive moisture content of the oil wells was reduced from 96.1% to 89.1%, and the cumulative yield was 3288t. The effect was good and the application prospect was broad.

**Keywords:**Oil displacement microorganism; viscosity reduction; interfacial properties; emulsification; contact angle; chemotaxis of a bacterium; EOR

**Foundation item：**National High Technology Research and Development Program of China (No. 2013AA064401)

**基金项目：**“十二五”国家863计划(2013AA064401)

**作者简介：**戴振华（1992-），男，硕士生。**联系人：**郭继香（1965-），女，教授，博士生导师。电话：010-89732129，E-mail：guojx002@163.com

在三次采油技术[1-2]中，由于微生物驱油技术兼具环保、低成本等特点，其是现代生物技术在石油开发领域创新性、开拓性的应用。胜利油田常规水驱动用地质储量为35.2亿吨，其中55℃~95℃的中高温油藏地质储量为18.3亿吨，占51.98%，储量巨大。胜利油田各个区块油井采出液样品检测结果资料中，中高温油藏中微生物多样性最高，生长繁殖情况好，代谢产物较为丰富，而且与低温油藏相比，中高温油藏微生物群落结构高度相似，激活中高温油藏微生物有利于油藏的高效开采，因此微生物驱油技术的经济、社会效益显著，有极重大的科学研究价值和现实应用意义。

微生物不仅可以通过自身生长代谢降解原油组分[3-5]，而且其代谢产物（如表面活性物质、有机溶剂、生物多糖、生物气体以及有机酸等）与岩石、油、水的相互作用，可以改变岩石、油、水的界面性质，提高洗油效率，从而达到提高原油采收率的目的[6]。作为微生物驱油技术中最关键因素，微生物的研究在国内外较为广泛，但所培养微生物对于降低原油黏度、油水界面张力以及乳化能力方面有所不足[7-9]，而且关于对微生物化学趋向性的研究较少。

高效微生物的培养和评价是本文研究的重点，本文利用高温高压流变仪、棒状薄层色谱分析仪、界面张力仪和动态接触角测量仪等对研制出的高效微生物SZ2进行了降黏性、界面活性、润湿和乳化分散等性能的评价，同时评价了微生物SZ2相比胜利油田现有微生物S3各项性能优势，然后探讨并分析了微生物化学趋向性现象及所带来的影响，最后进行了微生物SZ2采油现场实验。本文的研究对胜利油田微生物采油提供了高效优势菌种，为油田更深入的开发地层原油提供了理论依据和技术支持，为国内同类型油藏微生物采油提供了重要借鉴。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

胜利油田沾3区块原油、地层水、蛋白胨、葡萄糖、酵母粉（均为AR），山东旺盛生物科技有限公司；磷酸氢二钾、氯化钠（均为AR），济宁宏明化学试剂有限公司；

棒状薄层色谱定量分析仪（IATROSCAN MK-6s，日本IATROSCAN公司）；接触角仪（DCAT21型，德国Dataphysics公司）；Primostar生物显微镜（德国Carl Zeiss公司）；SVT20N旋转滴界面张力仪（德国EASTERN-DATAPHY公司）；流变仪（MCR301，奥地利AntonPaar公司）；密度仪（DMA45，奥地利 Anton Paar 公司）；摇床（TS-200B，上海天呈公司）；离心机（LDC2-1.2，北京长源实验仪器厂）；高压灭菌锅（YXQ-LS-100SII，上海博迅公司）。

1.2 微生物SZ2、S3的培养

取两个500mL锥形瓶，洗净烘干，分别标号1、2，向1号瓶中依次加入蔗糖、酵母粉、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、硝酸钠，质量分数分别为0.3%、0.15%、0.18%、0.17%、0.2%，向2号瓶中依次加入葡萄糖、蛋白胨、酵母粉、磷酸氢二钾、氯化钠，质量分数分别为0.3%、0.3%、0.2%、0.17%、0.15%，然后将沾3区块地层水倒入锥形瓶至200mL，用玻璃棒搅拌均匀，封口，在121℃灭菌20min，然后放入微生物培养箱，设定温度60℃，搅拌速度180r/min，培养7d，即得到1号S3微生物和2号SZ2微生物菌液。

1.3 微生物菌种鉴定

实验采用16SrDNA序列测序的方法来鉴定SZ2以及S3细菌种属，具体步骤请参考文献[10]。

1.4 微生物浓度测定

实验中采用血球计数板法[11]测定微生物浓度，步骤如下：

（1）取清洁的血球计数板，将盖玻片置于血球计数板上；

（2）将微生物发酵液稀释，以每小格有3~5个微生物最为合适；

（3）将微生物发酵液振荡均匀并稀释到一定倍数，再用无菌滴管吸取少量微生物发酵液，将其滴加到计数室内，待计数室内液体稳定后，先在低倍镜下找到网格，最后在高倍镜下计数。

1.5 原油族组分分析

按照行业标准SY/T 5119-2008(岩石中可溶有机物及原油族组分分析)[12]，采用棒状薄层色谱定量分析仪对微生物菌液作用前后的原油样品族组成所占质量分数进行测定。

1.6 原油黏度测定

采用高温高压流变仪，依据行业标准SY/T 0520-2008(原油黏度测定-旋转黏度计平衡法)[13]，测定不同温度下胜利油田沾3区块原油黏度。

1.7 油水界面张力的测定

实验采用SVT20N旋转滴界面张力仪在温度55℃~90℃下分别测定质量分数为0.1%的十二烷基苯磺酸钠（LAS）、微生物SZ2菌液和微生物S3菌液对胜利油田沾3区块原油和地层水之间的界面张力。

1.8 乳化分散性能测定

在两个250 mL的三角瓶中，分别装入SZ2和S3 50mL微生物菌液、50mL沾3区块脱水原油，在60℃下水浴振荡培养1d、2d、4d、10d、14d和40d，室温下静置1小时，观察原油的乳化分散结果。

1.9 储层岩石润湿性测定

油-水-岩石系统之间的接触角与油水对岩石的润湿程度有关，通过测量接触角，可了解油水对油藏岩石的润湿性。用石英矿片模拟沾3区块砂岩岩芯，并磨平抛光后用显微光度计观察，放大1000倍时无条痕。再将磨光矿片分别置于微生物SZ2、S3菌液和去离子水中浸泡，放入摇床中培养，温度设为60℃。培养0d、2d、4d、6d、8d后依据行业标准SY/T 5153-2007(油藏岩石润湿性测定方法)[14]，测量油-水-岩石系统的接触角，并判断其润湿性。油-水-岩石系统中三相交接处，其表面能的平衡关系符合杨-裘比原理，计算公式如下所示：

$$\cos(θ\_{c}=\frac{σ\_{os}-σ\_{ws}}{σ\_{ow}})$$

式中：$θ\_{c}$—接触角，°；

$σ\_{os}$—水和固体间的界面张力，mN/m；

$σ\_{ws}$—油和固体间的界面张力，mN/m；

$σ\_{ow}$—油和水间的界面张力，mN/m。

根据$θ\_{c}$的大小可以判别岩石的润湿性，具体如表1所示。

表 1 润湿性判断标准

Table 1 The standard of judgment on wettability

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 接触角$θ$ | 0$\leq θ\_{c}\leq $75° | 75°$\leq θ\_{c}\leq $105° | 105°$\leq θ\_{c}\leq $180° |
| 润湿性 | 亲水 | 中性润湿 | 亲油 |

1.10 趋界面效应分析

1.10.1 双凹载玻片实验

将双凹载玻片在121℃下灭菌20min，滴少量沾3区块原油于载玻片左端凹槽，滴少量微生物发酵液于载玻片右端凹槽，载玻片剩余空间用营养液填充。设定温度60℃，在10×10倍的显微镜下分别观察0h、1h、4h、8h油水界面处的微生物运移和富集情况。

1.10.2 距油水界面不同位置处微生物浓度变化

首先将玻璃盒在121℃下灭菌20min，在玻璃盒左端注入少量沾3区块原油，右侧剩余空间充满一定浓度的微生物发酵液，在油水界面处和距油水界面10mm、20mm、30mm处分别刻上标记，如图2，置于恒温箱中培养，每隔3h用灭菌后的取样器从油水界面处与距油水界面不同距离处取少量微生物菌样，按照1.4中的方法测定微生物浓度。

2 结果与讨论

2.1 微生物菌种鉴定及浓度分析

表2为微生物SZ2、S3所对应的菌种类型、外观以及密度和菌体个数结果。为防止染菌现象发生，影响相关实验，通过16SrDNA序列测序的方法再次确定菌种类型。

表 2 微生物发酵液分析结果

Table 2 The analysis results of microbial broth

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 微生物发酵液 | 菌种类型 | 外观 | 密度(g/L) | 菌体个数（个/mL） |
| 1 | S3 | 枯草芽孢杆菌 | 浅浊黄色 | 982 | 5.0×108 |
| 2 | SZ2 | 地衣芽孢杆菌 | 浊黄色 | 1082 | 4.4×108 |

由表2可知，SZ2为地衣芽孢杆菌，S3为枯草芽孢杆菌，无染菌现象发生。微生物SZ2发酵液外观呈浊黄色，微生物S3发酵液外观为浅浊黄色，两种微生物发酵液的密度均在1.0×103g/L左右，且菌体个数均超过108个/mL，说明微生物的发酵效果良好[15]。

2.2 微生物SZ2性能分析

2.2.1 原油降黏性能分析

表3为20℃、50℃、60℃、70℃、80℃、90℃下微生物作用前后的原油黏温性质结果。表4为微生物SZ2和S3分别与原油1:1（质量比）混合，恒温60℃下摇床培养15天，离心机进行油水分离后，常温（20℃）下所测得的原油族组分结果。

表 3 胜利油田沾3区块稠油黏温性质分析

Table 3 Analysis on the viscosity-temperature properties of heavy oil in Zhan3 of Shengli Oilfield

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  温度/℃黏度/mPa·s | 20 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| 作用前 | 7945 | 2505 | 1197 | 623.3 | 385 | 88.9 |
| SZ2作用后 | -- | 873.5 | 432.7 | 214.5 | 115.3 | 85.6 |
| S3作用后 | -- | 1194 | 853.2 | 383 | 261.8 | 87.4 |

注：“--”表示未进行该实验

表 4 胜利油田沾3区块稠油族组成分析

Table 4 Composition analysis of heavy oil Zhan3 of Shengli Oilfield

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 四组分 | *w*(饱和分)/% | *w*(芳香分)/% | *w*(胶质)/% | *w*(沥青质)/% | 回收率% |
| 作用前 | 7.29 | 22.37 | 49.92 | 20.42 | 100 |
| SZ2作用后 | 12.82 | 20.02 | 48.03 | 19.13 | 100 |
| S3作用后 | 10.05 | 20.96 | 49.01 | 19.98 | 100 |

由表3可知，胜利油田沾3区块原油常温（20℃）下黏度为7945 mPa·s，属于稠油，流动性差。温度为60℃时，原油与微生物SZ2、S3作用后黏度由1197mPa·s分别下降到432.7mPa·s和853.2mPa·s，下降了63.9%和28.7%，随着温度的上升，原油黏度大幅度下降，温度达到90℃时，黏度为88.9 mPa·s。由表4可知，与微生物SZ2、S3作用后原油中胶质、沥青质质量分数由70.34%分别下降至67.16%和68.99%，下降了4.5%和1.9%，饱和分所占质量分数上升。原油组分中对原油黏度影响大小为：沥青质＞胶质＞芳香分＞饱和分，且沥青质所占质量分数与原油黏度关系曲线近似为指数函数[16-18]，所以微生物对原油中沥青质和胶质的影响非常关键。一方面，微生物通过自身的生长代谢产生生物酶，这些生物酶将原油中相对分子质量较大的长碳链烃类（如正构烷烃、芳香烃）和非烃类（如胶质、沥青质）断裂，并转化为相对分子质量较小的短碳链烃类或非烃类，另一方面，微生物降解过程中能够使胶质与沥青质支链断裂，并且减少如C-N和C-O等基团数量，从而破坏胶质与沥青质结构，最终导致原油黏度下降[19,20]。

2.2.2 油水界面张力分析

图3为微生物菌液（SZ2、S3）、质量分数为0.1%的十二烷基苯磺酸钠（LAS）和去离子水（空白对照）分别与原油按照1:1（质量比）混合作用40天后进行油水分离，在温度55℃、65℃、75℃、85℃、90℃下所测得的油水界面张力结果。



图 3 不同体系作用后的油水界面张力

Fig. 3 The oil-water interfacial tension of different systems after effect

由图3中可知，质量分数为0.1%的LAS、微生物SZ2和微生物S3分别与原油作用后，55℃下，油水界面张力与去离子水对比分别降低了为65.89% 、59.18%和48.88%，比微生物S3多降低了十个百分点，说明微生物SZ2具有一定的界面活性，比微生物S3降低油水界面张力效果好，并且随着温度的升高油水界面张力不断减小，90℃下对比去离子水，使油水界面张力由37.54 mN/m降低到13.01 mN/m，下降了65.34%。相同温度下，不同体系界面活性强弱顺序依次为：0.1% LAS＞SZ2＞S3＞去离子水。微生物代谢作用可以产生生物表面活性物质，一般是脂肽类或者糖脂类[21]，微生物SZ2代谢会产生脂肽类表面活性剂，这种表面活性剂与化学合成表面活性剂类似，具有双亲性（分子两端基团，一端亲油，一端亲水），由于其含有多种组分的脂肽类混合物，结构多样，对油水界面的亲和力强，可以定向吸附于油水界面处，调控细胞表面的亲油性或亲水性，降低单位面积上油水界面能，使得油水界面张力降低，从而能吸收、乳化、润湿、分散、溶解水不溶的物质[22,23]。

2.2.3 乳化性能分析

图4为微生物SZ2、S3菌液和去离水与原油1:1（质量比）混合，恒温60℃下摇床培养1d、2d、4d、10d、14d和40d后与原油乳化分散结果示意图，图中从左到右依次是微生物S3、SZ2、去离子水。表4是不同时间下两种微生物菌液对原油乳化分散效果进行等级划分结果。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

a-1d;b-2d;c-4d;d-10d;e-14d;f-40d

图4 微生物与原油乳化分散效果

Fig. 4 The emulsifying effect of microbial and crude oil

表5 乳化分散效果记录

Table 5 The records of emulsifying effect

|  |  |
| --- | --- |
| 组别 | 乳化分散时间/d |
| 1 | 2 | 4 | 10 | 14 | 40 |
| S3菌液 | + | + | ++ | ++ | +++ | ++++ |
| SZ2菌液 | ++ | ++ | +++ | ++++ | ++++ | ++++ |
| 去离子水 | + | + | + | + | + | ++ |

注：用“+”的个数表示微生物发酵液与原油的乳化分散等级，+表示有效果（开始可见分散）、++表示效果较明显（还有较多大的油块）、+++表示效果很明显（有少许大的油块）、++++效果非常明显（基本完全分散）

由图4可以看出，2d后，从外观上观察，微生物SZ2菌液与原油乳化较为均匀，但有挂壁现象，4d后基本混相，而微生物S3菌液在14d后才与原油乳化均匀，最终在40d后，原油均完全乳化分散，说明微生物SZ2菌液乳化原油的速率比微生物S3菌液快，对原油有较强的乳化能力。由表5可知，随时间的增加，两种微生物菌液对原油的乳化效果增强，微生物SZ2菌液10d后与原油乳化效果非常明显，基本完全分散，而微生物S3到达该等级所用时间为40d，说明微生物SZ2与原油乳化周期短，为10d。微生物能乳化原油与界面的活性组分有关，一方面，在培养过程中微生物SZ2菌液产生生物表面活性剂，使得油水界面张力降低，减小了油相间的内聚力、粘附力以及毛管力，阻止了油相之间的靠近和聚并[22]，另一方面，摇床震荡培养使油相与生物表面活性剂接触机会增加，从而使大油滴分散成小油滴，二者均有利于乳状液的形成与保持稳定[17,24]。

2.2.4 储层岩石润湿性分析

图5为石英片在微生物SZ2、S3菌液和去离子水中经过不同时间浸泡后所拍摄的接触角变化示意图，图6为接触角变化与时间关系曲线图。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 时间/d | 0  | 2  | 4  | 6  | 8  |
| SZ2 |  |  |  |  |  |
| S3 |  |  |  |  |  |
| 去离子水 |  |  |  |  |  |

图 5 接触角变化示意图

Fig. 5 The schematic of contact angle changes



图 6 不同微生物作用后水滴与石英表面接触角的变化

Fig. 6 The contact angle changes of different microorganisms

由图5可以看出，初始时即对应图中0d，水滴在石英片上呈半圆形，润湿性接近中性，随着时间的推移，油滴慢慢铺展在石英片上，高度减小，长度增大，说明试片亲水性增强，亲油性减弱，6d后，经过微生物SZ2菌液浸泡后的石英片，油滴在上面铺展程度较微生物S3浸泡后的明显，说明石英片经微生物SZ2菌液作用后润湿性发生变化较快。由图6可知，随着时间推移，接触角逐渐减小，而去离子水并没有使接触角产生较大改变，微生物SZ2菌液使接触角下降幅度最大，8d后，使石英片由中性润湿的81.00°降低到亲水性的20.28°，下降了74.69%，而微生物S3菌液使接触角只下降到27.76°，降低程度为65.73%，比微生物SZ2低近九个百分点，说明微生物SZ2改变石英片的润湿性能力较强。微生物作用油藏岩石表面随时间增长，油藏岩石的亲水性逐渐增强，减少残余油粘附功，较好的改变了注水驱油的毛管力，使注入水越易剥离粘附在岩石表面上的油滴或油膜，有利于提高油藏采收率[25,26]。

2.2.5趋界面效应分析

图7为微生物SZ2在油水界面处运移和富集情况在不同时间下的变化示意图。图8为距离油水界面不同位置处菌浓随时间的关系曲线。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

a-0h;b-1h;c-4h;d-8h

图7 不同时间微生物SZ2在界面处浓度变化

Fig. 7 Different time microbial SZ2 concentration at the interfaces change



图 8 SZ2菌随时间的变化在离油水界面不同距离处的浓度

Fig. 8 The concentration over time at different distances away from the oil-water interface of SZ2

由图7可看出，0h时，油水界面处没有微生物SZ2存在，但随时间推移，1h后微生物SZ2在油水界面处开始富集，8h后在界面处富集程度更加明显。由图8可知，30h之前，四个位置处的微生物SZ2浓度逐渐上升，30h后基本无变化，距离油水界面不同位置处微生物浓度不同，在界面处微生物浓度最高，其余依次是距界面10mm、20mm和30mm处。这是因为微生物可以通过外界环境中化学物质浓度变化来将这些信息转化为细胞内信号，从而改变其运动方向[27,28]。微生物SZ2在所适宜的生长温度下，表现出明显的向油水界面处移动的结果，使得微生物向原油碳源浓度高处高度富集，说明微生物具有趋界面效应。正是因为微生物存在趋界面效应，这种效应为微生物生长繁殖提供了向油水界面处移动和聚集的趋势，才能使微生物在油水界面处生长繁殖，并且代谢产生例如表面活性物质、气体、聚合物等有利于提高驱油效率的产物，在油水界面处形成局部浓度优势，进而发挥微生物采油功能作用，提高残余油采出程度[29]。

1. 高效微生物SZ2现场应用

胜利油田沾3试验区油藏，平面非均质性较严重，油藏平均渗透率为978×10-3μm2，渗透率变异系数0.42，孔隙度32.3%，属中高渗油藏，油藏压力12.4MPa，温度60℃，矿化度为10220mg/L，原油黏度7945mPa·s，地质储量为282×104t。利用培养出的高效微生物SZ2对沾3区块试验区油藏进行现场实验，表6为微生物SZ2在胜利油田沾3区块现场实验结果。

表 6 胜利油田沾3区块微生物SZ2现场实验结果

Table 5 Analysis on the effect of microbial SZ2 in Zhan 3 of Shengli Oilfield

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 措施 | 平均井口压力/MPa | 平均含水率/% | 区块产油量/t | 油井平均产油量/t·d-1 | 累积增油量/ t |
| 作业前 | 7~8 | 96.1 | 57.6 | 3.6 | -- |
| 作业后 | 8~9 | 89.1 | 85.0 | 5.3 | 3288 |

“--”表示以微生物SZ2作业前为基准

现场实验3口水井，16口油井，其中13口油井取得较好的增油效果，有效率81.25%。由表6可知，未实施微生物SZ2采油前，试验区平均井口压力为7~8MPa，综合含水率为96.1%，产油量57.6t/d，单井平均产量为3.6t/d；而实施微生物SZ2后，试验区平均井口压力也上升到8~9MPa，平均上升1MPa，综合含水率下降至89.1%，下降了7个百分点，降水效果明显；区块产油量上升至85.0t/d，平均增加22.4t/d，单井平均产量增至5.3t/d，平均增加1.7t/d，累积增油量为3288t，增产效果明显，结果表明微生物SZ2现场应用良好，效果显著。

1. 结论

本文利用葡萄糖、蛋白胨、酵母粉、磷酸氢二钾、氯化钠，在60℃下，培育出了高效微生物SZ2，对原油降黏率、界面性质、乳化分散等各项能力效果较好。

（1）微生物SZ2具备降低原油中重组分质量分数的能力，60℃下，可使原油黏度降低63.9%，胶质、沥青质质量分数分别降低1.89%和1.29%。

（2）微生物SZ2能有效改善油水界面性质，降低油水界面张力，55℃下相比于去离子水，油水界面张力由40.96mN/m降低到16.72mN/m，降低值可达59.18%，表现出优异的降低油水界面能力。并且微生物SZ2具有较强的乳化能力，60℃下10天可乳化分散稠油，改善稠油流动性质。

（3）微生物SZ2改变岩石润湿性方面速率较快，能力较强，与石英片作用8d可使接触角由81.00°降低至20.28°，降低率可达74.69%，岩石润湿性由亲油性转变为亲水性。

（4）微生物具有化学趋向性，在适宜的生长温度下，向原油碳源处高度富集，在油水界面处生长繁殖，同时代谢产生表面活性剂等多种有利于改善油水界面性质的物质，能有效提高地层原油的开发和利用。

（5）现场实验结果表明，微生物SZ2对油井降水增油效果明显，含水率由96.1%下降至89.1%，产量由57.6t/d上升至85.0t/d，增加了22.4t/d。现场实验的成功为微生物驱油技术提供了宝贵的技术支持和理论依据，为国内同类型油田提供了借鉴，在适宜微生物采油的巨大的地质储量下，拥有更为广阔的应用前景。

**参考文献**

1. Sarafzadeh P,Niazi A,Oboodi V,*et al*.Investigating the efficiency of MEOR processes using Enterobacter cloacae and Bacillus stearothermophilus SUCPM# 14 (biosurfactant-producing strains) in carbonated reservoirs[J].Journal of Petroleum Science & Engineering,2013,113(1):46-53.
2. Patel Jay,Borgohain Subrata,Kumar Mayank, *et al*. Recent developments in microbial enhanced oil recovery[J].Renewable & Sustainable Energy Reviews,2015,52:1539-1558.
3. Qin Fangling(秦芳玲),Fan Yue(樊月),Bai Haitao(白海涛).Research progress of microbial enhanced oil recovery technology[J].Modern Chemical Industry(现代化工),2016,36(1):49-52.
4. Gai Lixue(盖立学),Wang Yanling(王艳玲),Bai Lulu(柏璐璐),*et al*.Application of MEOR technology in the low-permeability reservoirs of Daqing oilfield[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing(大庆石油地质与开发),2011,30(2):145-149.
5. Zhang Xiangchun(张相春),Sun Wei(孙卫),Wang Deyu(王德玉),*et al*.Displacing law and influencing factors of MEOR in low-permeability oilfields[J].Journal of Northwest University(Natural Science Edition)(西北大学学报),2014,44(5):801-807.
6. Gaytán I,Mejía M Á,Hernández-Gama R.Effects of indigenous microbial consortia for enhanced oil recovery in a fragmented calcite rocks system[J].Journal of Petroleum Science & Engineering,2015,128:65-72.
7. P Sarafzadeh,HA Zeinolabedini,S Mohammadi,*et al*.Modification of rock/fluid and fluid/fluid interfaces during MEOR processes, using two biosurfactant producing strains of Bacillus stearothermophilus SUCPM#14 and Enterobacter cloacae : A mechanistic study[J].Colloids & Surfaces B Biointerfaces,2014,117(5):457-465.
8. El-Sheshtawy H S, Aiad I, Osman M E, et al. Production of biosurfactant from Bacillus licheniformis for microbial enhanced oil recovery and inhibition the growth of sulfate reducing bacteria[J]. Egyptian Journal of Petroleum,2015,24(2):155:162.
9. Xu Haofei(徐豪飞),Shi Leiting(施雷霆),Ye Zhongbin(叶仲斌),*et al*.Enhanced oil recovery of heavy oil reservoir in high water cut stage by using microbe[J].Applied Chemical Industry(应用化工).2013,42(1):15-17.
10. Liu Chaojun(刘朝军) Shen Dingxia(沈定霞).Application of 16SrDNA sequencing for identification of bacteria[J].Academic Journal of Chinese PLA Medical School(解放军医学院学报).2011,32(7):774-776.
11. Liang Qiang.Brief introduction to the construction and use of blood cell counting plate[J].Biology Teaching in Middle School(中学生物教学),2008(8):54-55.
12. Petroleum Geological Exploration Professional Standardization Committee(石油地质勘探专业标准化委员会).Analysis method for fractions of rock extract and crude oil(岩石中可溶有机物及原油族组分分析):SY/T 5119-2008[S].Beijing：Petroleum industry press(石油工业出版社),2008.
13. Standardization Technical Committee for Standardization of Oil and Gas Metering and Analytical Methods(油气计量及分析方法专业标准化技术委员会).Viscosity determination of crude petroleum-equilibrium method by rotational viscometer(原油黏度测定-旋转黏度计平衡法):SY/T 0520-2008[S].Beijing：Petroleum industry press(石油工业出版社),2008.
14. Oil and Gas Field Development Professional Standardization Committee(油气田开发专业标准化委员会).Test method of reservoir rock wettability(油藏岩石润湿性测定方法):SY/T 5153-2007[S].Beijing：Petroleum industry press(石油工业出版社),2007.
15. Li Caifeng(李彩风),Liu Tao(刘涛),Hu Jing(胡婧),*et al*.一种具有调剖功能的內源微生物激活剂及其效果评价方法:CN:105255734A[P].2016-01-20.
16. Jixiang Guo,Chaogang Chen, Heyi Wang,*et al*.The Influence of Separated Fractions on Crude Oil Viscosity[J].Petroleum Science & Technology,2012,30(23):2393-2400.
17. Yuqi Yang,Jixiang Guo,Zhongfu Cheng,*et al*.New composite viscosity reducer with both asphaltene dispersion and emulsifying capability for heavy and ultra-heavy crude oils[J].Energy Fuels,2017,31(2),1159–1173.
18. Wen Ping(文萍),Zhang Qing(张庆),Li Chuan(李传),*et al*.Effect of asphaltene on viscosity of viscous oils[J],Petroleum Processing and Petrochemicals(石油炼制与化工),2016,47(7):32-37.
19. Bian Yanqing(边岩庆),Tao Wen(陶文).The molecular structure changes of resia and asphaltene during the degradation of crude oil[J].Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)(长江大学学报：自然科学版),2010,7(1):177-179.
20. Guo Xiaobo(郭晓博).Analysis of metabolites of microbial degradation of crude oil[D].Jingzhou:Yangtze University(长江大学),2013.
21. Sun Maocheng(孙茂成),Chen Xi(陈曦),Li Huaiwei(李怀伟),*et al*.Production process of microbial surfactants and its application in food additives[J].Food&Machinery(食品与机械),2016,32(10):205-209.
22. Healy,M.G,Devine C M,Murphy R.Microbial production of biosurfactants\*[J].Studies in Environmental Science,1996,18(1),41-57.
23. Wang Ping(王萍).Reserch on formation mechanism and influence factors of emulsion on microbial enhanced oil recovery[D].Beijing: Institute of seepage fluid mechanics(渗流流体力学研究所),2013.
24. Zhao Shouzeng(赵寿增).Microbial enhanced oil recovery technology[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency(油气地质与采收率),1996,3(1):14-22.
25. Wang Hui(王惠),Lu Yuan(卢渊).The summarization of microbial enhanced oil recovery technology[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing(大庆石油地质与开发),2003,22(5):20-21.
26. Lei Guanglun(雷光伦),Li Ximing(李希明),Chen Yueming(陈月明),*et al*.Laboratory studies of microbial action on rock surface and fluids in reservoir formations[J].Oilfield Chemistry(油田化学),2001,18(1):71-75.
27. Parkinson JS.Protein phosphorylation in bacterial chemotaxis[J].Cell,1988,53(1):1-2.
28. Bourret RB,Hess JF,Borkovich KA *et al*.Protein phosphorylation in chemotaxis and two-component regulatory systems of bacteria[J].Journal of Biological Chemistry.,1989,264(13):7085～7088.
29. Jing Guicheng(景贵成),Guo Shangping(郭尚平),Yu Li(俞理).Studies on the chemotaxis of a bacterium *Pseudomonas sp.* using crude oil as carbon source[J].Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Science(中国科学院研究生院学报),2005,22(2):187-191.