

文章编号: 0253-2697(2015)04-0490-06 DOI:10.7623/syxb201504010

微生物与弱凝胶复合驱油配伍性

齐义彬¹ 曹美娜² 黄立信³ 崔庆锋³ 俞理³ 吴永锋⁴

(1. 中国科学院大学渗流流体力学研究所 河北廊坊 065007; 2. 南开大学生命科学学院 天津 300071;

3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院 河北廊坊 065007; 4. 中国石油新疆油田公司采油二厂 新疆克拉玛依 834008)

摘要:为了推动宝力格油田巴19断块弱凝胶调驱和微生物驱复合驱油实验研究,对弱凝胶与微生物的配伍性进行了实验分析。芽孢杆菌 Chang 和 Jian 分离自巴19断块地层水,这两株菌对原油的降解率分别达到 160 mg/d 和 138 mg/d、降黏率达到 50.5% 和 66.3%,形成的原油乳状液油滴平均粒径为 38.22 μm 和 18.54 μm 。经测定,两株菌均能代谢产生脂肽类表面活性剂,产量分别为 682 mg/L 和 476 mg/L。微生物和弱凝胶的配伍性实验发现,菌株 Jian 对弱凝胶的成胶性能没有影响;在弱凝胶调驱的现场使用浓度内,Jian 的生长代谢、乳化分散(表面张力为 40.78 mN/m、乳化原油平均粒径为 22.46 μm)、降黏(降黏率为 132 mg/d)和降解(降解率为 63.6%)能力也没有明显降低。弱凝胶和微生物复合驱油在弱凝胶驱的基础上可提高采收率 7.26%,在微生物驱基础上可提高采收率 12.67%,说明菌株 Jian 与该弱凝胶复合驱油具有良好的配伍性。

关键词:微生物;弱凝胶;配伍性;降黏;提高采收率

中图分类号: TE357

文献标识码: A

Compatibility of microbe-weak gel combinational flooding

Qi Yibin¹ Cao Meina² Huang Lixin³ Cui Qingfeng³ Yu Li³ Wu Yongfeng⁴

(1. Institute of Porous Flow & Fluid Mechanics, University of Chinese Academy of Sciences, Hebei Langfang 065007, China;

2. College of Life Sciences, Nankai University, Tianjin 300071, China, 3. Langfang Branch, PetroChina Research Institute of

Petroleum Exploration and Development, Hebei Langfang 065007, China; 4. The Second Oil Production Plant,

PetroChina XinJiang Oilfield Company, Xinjiang Karamay 834008, China)

Abstract: In order to promote the research on the weak gel-microbe combinational flooding in Block Ba 19, Baolige Oilfield, experimental analyses were carried out on the compatibility of weak gel and microbe. Bacillus Chang and Jian were isolated from the formation water in Block Ba 19. The oil degradation rate of both bacilli reaches 160 mg/d and 138 mg/d respectively; the viscosity reducing ratio is 50.5% and 66.3% respectively; the droplet diameter of crude oil emulsion is 38.22 μm and 18.54 μm respectively. It is determined that both bacilli can produce lipopeptide surfactant by metabolism with the yield of 682 mg/L and 476 mg/L respectively. Through experiment on the compatibility of microbe and weak gel, it is found that Bacillus Jian has no effect on the gel performance of weak gel; within the range of concentration used in the actual weak gel flooding site, no significant reduction occurs to the growth metabolism, emulsion dispersion (surface tension and average grain size of emulsified crude oil are 40.78 mN/m and 22.46 μm respectively), reduction of viscosity (viscosity reducing ratio of 132 mg/d) and degradation capacities (degradation rate of 63.6%) of Bacillus Jian. The weak gel-microbe combinational flooding can enhance the recovery by 7.26% and 12.67% on the basis of weak gel flooding and microbial flooding respectively, thus proving the favorable compatibility of Bacillus Jian with the weak gel combinational flooding.

Key words: microbe; weak gel; compatibility; viscosity reduction; enhanced oil recovery

引用:齐义彬,曹美娜,黄立信,崔庆锋,俞理,吴永锋.微生物与弱凝胶复合驱油配伍性[J].石油学报,2015,36(4):490-495.

Cite: Qi Yibin, Cao Meina, Huang Lixin, Cui Qingfeng, Yu Li, Wu Yongfeng. Compatibility of microbe-weak gel combinational flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(4): 490-495.

近年来,中国陆上油田已相继开展了不同规模的三次采油技术研究,各油田区块依据油藏特点实施了微生物驱或弱凝胶驱油等三次采油技术的现场试验^[1,2],并取得了不错的应用效果。

微生物驱技术是利用微生物菌体及其代谢产物与原油或油藏相互作用,提高驱油效率的一种三次采油技术^[3,4]。其中的弱凝胶驱油技术就是使用略高于聚合物驱浓度的聚合物,加入少量延缓型交联

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2013AA064402)资助。

第一作者:齐义彬,男,1985年12月生,2012年获南开大学学士学位,现为中国科学院大学渗流流体力学研究所博士研究生,主要从事微生物提高采收率领域的研究工作。Email: qybn118@163.com

通信作者:俞理,男,1964年8月生,1987年获兰州大学学士学位,现为中国石油勘探开发研究院廊坊分院高级工程师,主要从事微生物提高采收率方面的工作。Email: yuli69@petrochina.com.cn

剂,在地层内缓慢生成弱凝胶,在后续水驱的作用下由高渗透通道缓慢地向地层深部移动,能够调剖和扩大波及体积^[5,6]。

许多三次采油现场试验结果发现,微生物或弱凝胶驱后油层中仍有一部分可开发的原油残留,究其原因,Dunsmore等^[7]认为微生物驱难以达到扩大波及体积的目的,而弱凝胶驱油也只能改变吸水剖面,对持续稳产的效果有限。为此Evans等^[8]通过室内实验探讨了微生物-三元复合驱联作提高采收率技术,赵福麟等^[9]也提出了二次采油和三次采油技术联作的可行性,并探讨了该技术的应用前景。利用聚合物进入油藏的高渗透孔道,形成一定半径的阻挡屏障,迫使其后续注入的微生物菌液分流进入中、低渗透层段,与地层中的剩余油和以不连续油滴方式残留于地层孔隙间的原油作用,形成可以连续流动的油流,从而被后续注入水驱替出来^[10]。实现了将扩大波及体积和提高洗油效率两种驱油机理的结合。

笔者以宝力格油田巴19断块为研究对象,从油藏地质角度分析了实际油藏条件下进行微生物-弱凝胶联作提高采收率的问题。通过研究微生物在弱凝胶中的生长代谢情况,分析了微生物对弱凝胶成胶黏度的影响,以及通过微生物-弱凝胶复合驱油等实验证明所用微生物与弱凝胶复合驱油的配伍性。

1 材料和方法

1.1 菌种的筛选

芽孢杆菌(*Bacillus* sp.)Chang分离自巴19断块采油井B18-42,其能够利用无机盐培养基降解原油。最适生长温度为58℃,16S rRNA(Genbank序列号为KJ630829)与蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus* strain GY-58)的同源性为99%。

芽孢杆菌(*Bacillus* sp.)Jian分离自巴19断块采油井B19-5,其能够利用无机盐培养基降解原油,利用无机盐和工业级葡萄糖产生脂肽类表面活性剂,最适生长温度为58℃,16S rRNA(Genbank序列号为KJ630830)与地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis* strain UTM108)的同源性为99%^[11]。

1.2 实验材料

1.2.1 油水样

实验采用宝利格油田巴19断块的B油井采出水,平均矿化度为3500 mg/L,水质为碳酸氢钠型,油样为B井原油,脱水脱气后的黏度为42.2 mPa·s(58℃)。

1.2.2 培养基

无机盐培养基:K₂HPO₄为0.8 g/L,NaH₂PO₄为

0.4 g/L,MgSO₄·7H₂O为0.2 g/L,CaCl₂·2H₂O为0.1 g/L,NaCl为0.2 g/L,酵母粉为0.1 g/L,pH值为7.2。

1.2.3 调剖剂

聚合物为北京恒聚公司生产的部分水解聚丙烯酰胺,缓释交联剂为CrCl₃。配制水为矿化度3500 mg/L的NaCl溶液。

1.3 实验方法

1.3.1 弱凝胶的配制与流变性测定

质量浓度为1000 mg/L的聚合物中按30:1的聚交比加入交联剂CrCl₃,调节溶液的pH至9,混合均匀后放入58℃恒温箱静止生成弱凝胶。用流变仪测定弱凝胶在不同剪切速率下的黏度。

1.3.2 弱凝胶对微生物生长曲线的影响

微生物发酵的初始阶段分别加入成胶前、成胶后、凝胶降解后的弱凝胶体系,以及不同浓度的交联剂(Cr³⁺),测定微生物的繁殖情况^[12]。

1.3.3 菌株培养

芽孢杆菌Chang和Jian的发酵时间均为48 h,培养温度为58℃。两菌以120 r/min振荡培养,接种量为5%。

1.3.4 原油黏度的测定

30 mL发酵液(Chang,Jian,Jian+弱凝胶)与30 g B井原油混合后,在58℃、120 r/min振荡的条件下培养7 d,为防止轻质成分挥发,震荡培养过程中加盖密闭性好的硅胶塞,将乳化后原油中加入质量分数为0.0001%的破乳剂,密闭加热到80℃,以16000 r/min离心10 min去除水分。用BROOK FIELD VISCOMETER LVDV-III ULTRA型提桶式黏度计测定黏度,在3 min、5 min、8 min分别读取黏度值,并取其平均值^[13,14]。

1.3.5 重量法测定原油降解率

将微生物发酵液(Chang,Jian,Jian+弱凝胶)以5%的接种量接种于原油含量为2%的100 mL无机盐培养基中,经过58℃、120 r/min振荡培养7 d,转移摇瓶内的所有原油和培养基到预先称重的250 mL离心杯中,以8000 r/min离心10 min,除去培养基和菌体。在40℃温箱烘干到恒重后称重,并计算离心杯的重量变化。

1.3.6 乳状液颗粒粒径测定

将3 mL B井原油和3 mL发酵液(Chang,Jian,Jian+弱凝胶),于室温震荡1 min,静置24 h。将乳化层制成显微观察片,随机测量50个乳化油粒直径,计算原油乳状液颗粒的平均直径。

1.3.7 原油四组分分析

根据硅胶-氧化铝双吸附法^[15]分析微生物作用

前、后原油四组分含量的变化,计算出降解前、后原油组分变化。保证分析样品的回收率达到85%以上^[16]。

1.3.8 脂肽的提取

将菌株 Chang 和 Jian 在 LB 培养基斜面上划线培养(58℃)24 h 后用无菌水将菌体洗下,将 1×10^6 cfu/mL 的发酵菌液作为种子液接入 100 mL 无机盐培养基 + 5% 工业级葡萄糖发酵培养,在 58℃ 条件下振荡培养(150 r/min)72 h,将发酵液以 8000 r/min 离心 10 min 除菌体,上清液中加盐酸调整 pH 到 2,在 4℃ 冰箱沉淀 12 h;10000 r/min 离心 10 min,收集沉淀;用体积比为 3:1 的 CHCl_3 和 CH_3OH 溶液萃取上清液 5 次,合并萃取相浓缩,用 pH 为 2 的 HCl 水溶液洗涤浓缩液 5 次,调整 pH 到 7,真空干燥,加入正己烷洗涤 3 次除去脂肪酸,离心收集沉淀并干燥,最后用 CH_2Cl_2 于 50℃ 抽提 10 h,除去 CH_2Cl_2 后干燥析出沉淀并称重^[17,18]。

1.3.9 沉淀物的 HPLC-ESI-MS 鉴定

将 1.0 g 沉淀溶于 5 mL 体积比为 1:1 的乙腈和水的混合溶剂中,以 9000 r/min 离心,离心上清液用 HPLC-ESI-MS 进行组分分析。利用 Agilent 1100 高效液相色谱-电喷雾质谱联用仪分析,并使用 C18-MS-II 反相色谱柱(截面直径为 2.6 mm,长度为 250 mm)。进样量为 10 μL ,流动相为乙腈-水,采用线性梯度洗脱,流速为 0.2 mL/min。在 0~10 min 内由乙腈的体积比从 30% 线性提高到 50%,在 10~60 min 内乙腈的体积比从 50% 线性提高到 60%。质谱条件为:雾化气和干燥气都为氦气,脱溶温度为 250℃,传输电压为 70 V,喷雾压力为 0.27 MPa,正离子毛细管电压为 3500 V,正离子锥孔电压为 25 V,选择离子扫描范围 m/z 为 300~2000^[19,20]。

1.3.10 物理模拟实验

利用胶结岩心模拟巴 19 断块油藏条件,岩心为 3 层等高非均质岩心,相关参数见表 1 所示,温度为 58℃,背压为 8 MPa,驱替速度为 1.0 mL/min。驱替水采用现场注入水,58℃ 时黏度为 0.69 mPa·s;实验用油采用黏度为 42.2 mPa·s 的 B 井原油。

实验步骤为:①装填岩心,抽真空 2 h 后饱和地层水;②测定岩心水相渗透率,计算岩心孔隙度;③用黏度为 42.2 mPa·s 的原油饱和岩心,出口设背压阀,加压至 8 MPa 并全程保持,计算含油饱和度,老化岩心 3 d;④一次水驱,注地层水至待产出液含水率达到 98%;⑤按照实验方案注入驱油体系 0.4 PV,在 58℃ 恒温下放置 7 d;⑥二次水驱,注地层水至待产出液含水率达 98%,计算采收率^[21,22]。

表 1 非均质岩心参数

Table 1 Parameters of nonhomogeneous core samples

| 渗透层 | 厚度/ cm | 孔隙度/ % | 长×宽×高/ (cm×cm×cm) | 渗透率/ mD | 平均渗透率/ mD |
|------|-----------|-----------|----------------------|------------|--------------|
| 高渗透层 | 1.5 | | | 1200 | |
| 中渗透层 | 1.5 | 28.7 | 30.0×4.5×4.5 | 800 | 870 |
| 低渗透层 | 1.5 | | | 500 | |

2 结果与讨论

2.1 微生物对弱凝胶流变性的影响

测定弱凝胶在不同剪切速率下的黏度,其结果如图 1 所示。弱凝胶流变性曲线类似双曲线。一方面弱凝胶属于剪切稀释型非牛顿流体,具有较好的抗剪切性;另一方面可以在注入时加入延缓性交联剂,这样在后续注入水的推动下,在高渗透通道中还能缓慢向地层深部移动,这种动态的波及效果要好于固定凝胶的波及效果,从而能更大限度地扩大波及体积和提高驱油效率。因此弱凝胶作为调驱聚合物具有一定的优势^[23]。将浓度为 1×10^8 cfu/mL 菌株 Jian 加入到聚合物成胶的过程中,其黏度没有明显变化(图 1),说明菌株 Jian 对弱凝胶的成胶性能没有影响。

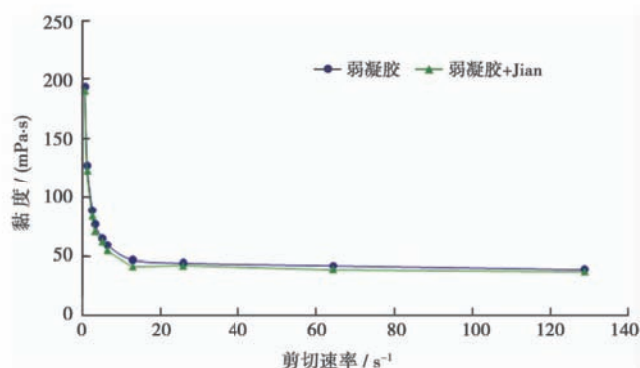


图 1 弱凝胶和加入菌株 Jian 的弱凝胶流变曲线

Fig. 1 Rheological curves of weak gel and join strain Jian

2.2 弱凝胶对微生物生长曲线的影响

按照实验方法^[12],Jian 在各体系中的生长情况如图 2 所示。弱凝胶成胶前和降解后对 Jian 的繁殖有轻微影响,成胶前的弱凝胶降低稳定期菌量约 30%,降解后的弱凝胶降低稳定期菌量约 13%,这应该是丙烯酰胺及交联剂 Cr^{3+} 对菌体生长繁殖有毒害作用的原因,成胶的弱凝胶对菌体的生长没有影响。说明丙烯酰胺与 Cr^{3+} 交联后对菌体无毒性。从图 2(b)可知,交联剂 Cr^{3+} 的质量浓度达到 200 mg/L 以上才开始对 Jian 的繁殖产生影响,200 mg/L 的 Cr^{3+} 降低 Jian 稳定期菌浓度约 10%; Cr^{3+} 的浓度达到 500 mg/L 时降低稳定期菌量约 28%。从上述结果可知,在该弱凝胶

调驱的现场使用浓度(1 000 mg/L 丙烯酰胺和 33 mg/L Cr^{3+})内,Jian 的生长不会受到影响。弱凝胶对 Jian

驱油性能的影响,还需要后续的降解降黏和驱油实验进行论证。

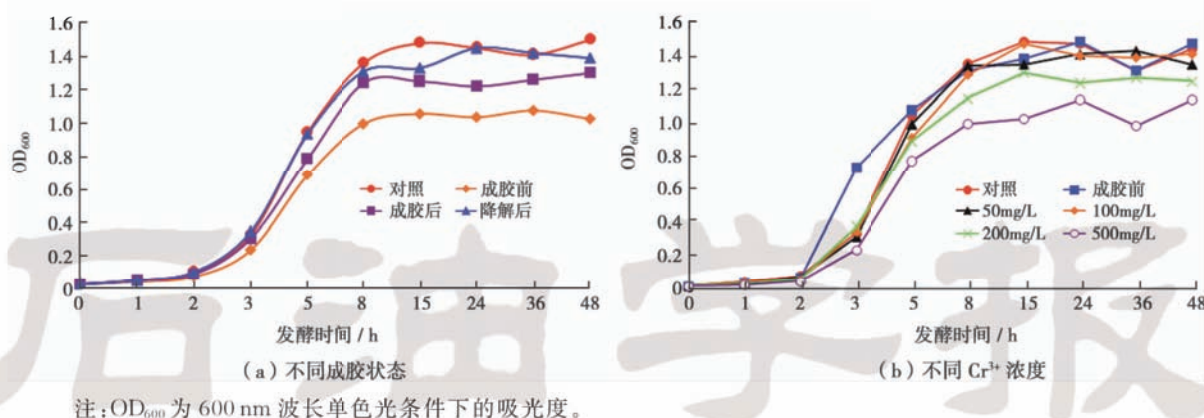


图2 不同条件下菌株 Jian 与弱凝胶配伍后的生长曲线

Fig.2 Growth curve of strain Jian in different conditions

2.3 弱凝胶对微生物降解和降黏作用的影响

按照实验方法,菌株 Chang 和 Jian 的原油降解率分别达到 160 mg/d 和 138 mg/d(表 2)。原油降黏率分别达到 50.5%和 66.3%(表 2)。四组分分析结果表明,Chang 和 Jian 降解后原油的化学组分发生了一定程度的变化,饱和烃相对含量有所上升,芳香烃和胶质的相对含量降低了 11.90%和 9.45%(图 3)。说明这两株菌对原油具有降解和降黏作用。在菌株 Jian 的降解和降黏实验中加入质量浓度为 1 000 mg/L 的弱凝胶,原油的降解率和降黏率也达到了 132 mg/d 和 63.6%(表 2),芳香烃和胶质的相对含量也降低了 9.44%(图 3)。说明在实验浓度条件下弱凝胶对微生物的降解和降黏效果影响不明显。

表 2 菌株 Chang 和 Jian 及加入弱凝胶的降黏能力

Table 2 Viscosity reduction ability with hydrocarbon-degrading strain Chang,Jian and join weak gel

| 项目 | 黏度/ (mPa·s) | 降黏率/ % | 降解速率/ (mg·d ⁻¹) |
|---------------|----------------|-----------|--------------------------------|
| B 井对照 | 42.20 | | |
| Chang 降解 | 35.20 | 50.5 | 160 |
| Jian 降解 | 31.50 | 66.3 | 138 |
| 弱凝胶 + Jian 降解 | 30.25 | 63.6 | 132 |

2.4 弱凝胶对微生物乳化分散作用的影响

Chang 和 Jian 作用均能使原油在整个培养基中呈均匀分散状态。Chang 发酵液的表面张力由 55.28 mN/m 降低至 42.06 mN/m,Jian 发酵液的表面张力由 55.28 mN/m 降低至 39.66 mN/m。油滴粒径显微图像统计结果表明 Chang 和 Jian 乳化原油平均粒径仅为 38.22 μm 和 18.54 μm 。以上数据进一步说明了这两株菌对原油都具有良好的乳化分散性能^[24]。为了研究这两株微生物的乳化机理,对菌株 Chang 和

Jian 所产表面活性剂的种类进行了定性和定量分析。从图 4 可以看出,菌株 Chang 和 Jian 产生主要成分为 1 044.72 m/z 和 1 030.70 m/z 的脂肽类表面活性剂。Chang 和 Jian 脂肽产量分别达到 476 mg/L 和 682 mg/L。在菌株 Jian 的产脂肽培养基中加入质量浓度 1 000 mg/L 弱凝胶,脂肽的产量也有 577 mg/L,表面张力和乳化原油平均粒径也没有明显的变化(40.78 mN/m 和 22.46 μm),这说明弱凝胶使微生物的乳化分散能力没有明显降低。

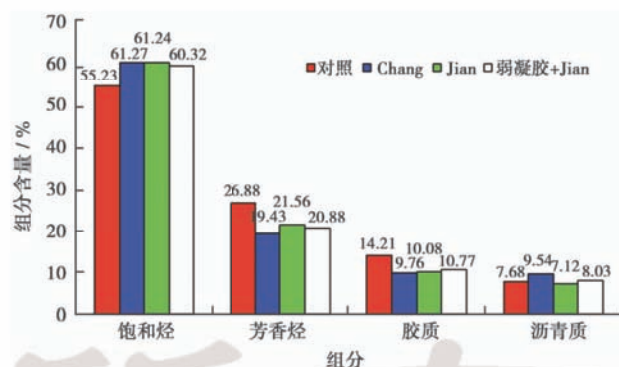


图3 菌株 Chang 和 Jian 及加入弱凝胶降解原油四组分分析

Fig.3 Four component analysis of crude oil after Chang,Jian and join weak gel degradation

2.5 微生物与弱凝胶的配伍性驱油

物理模拟实验结果可知,Chang 和 Jian 发酵液能大幅提高原油采收率。在物理模拟驱油实验中 Chang 和 Jian 发酵液能提高原油采收率 9.53 % 和 9.83%;弱凝胶体系提高原油采收率 16.24%;先注入 0.1 PV 弱凝胶调剖,再注入 0.3 PV Jian 发酵液,采收率进一步提高至 22.50%(表 3)。说明菌株 Jian 与该弱凝胶具有良好的配伍性,对驱油具有协同增效的作用,具备技术联作的实用性,对所模拟的油藏有一定的应用前景^[25]。

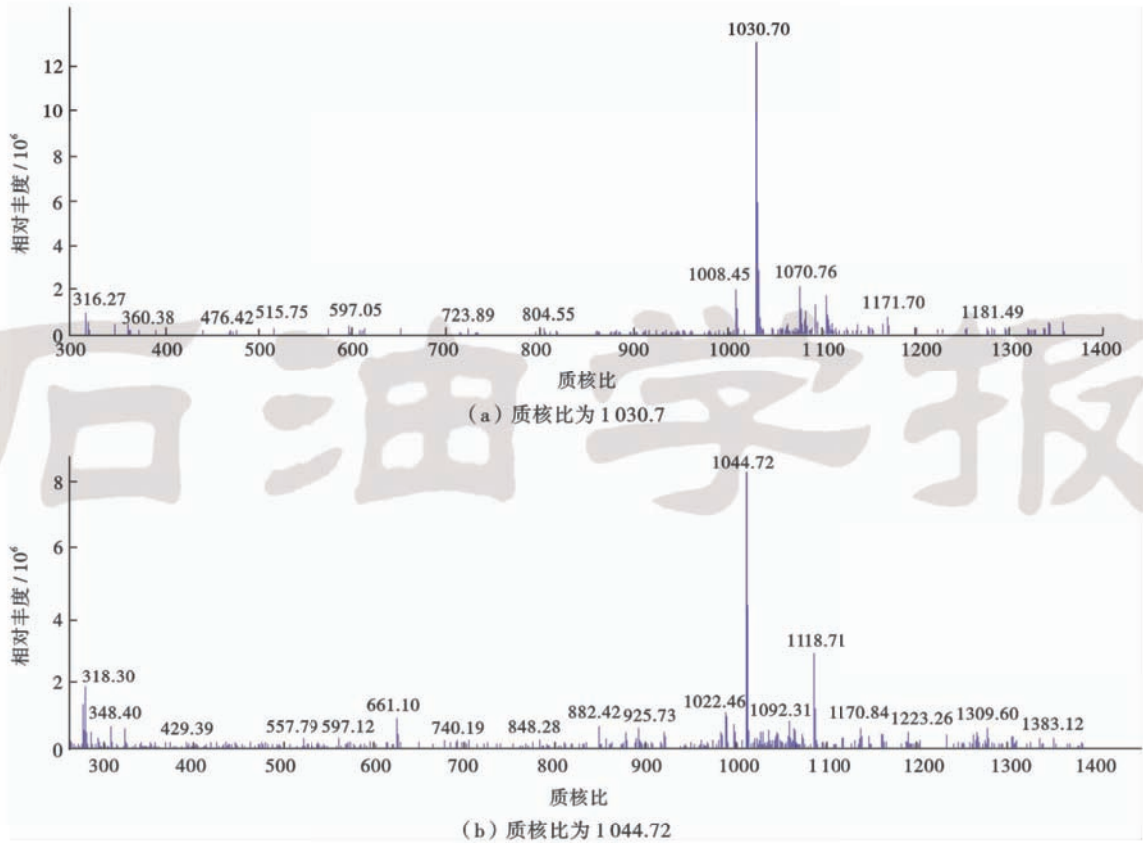


图 4 不同质核比的脂肽质谱
Fig. 4 Mass spectra and structures of lipopeptid

表 3 物理模拟实验参数及结果

Table 3 Physical simulation experimental parameters and results

| 项目 | 原油饱和量/mL | 一次水驱采收率/% | 最终采收率/% | 提高采收率/% |
|--------------------------------|----------|-----------|---------|---------|
| 空白岩心 | 126.57 | 32.58 | | |
| 菌株发酵液 Chang | 132.88 | 30.15 | 39.68 | 9.53 |
| 菌株发酵液 Jian | 128.26 | 32.15 | 41.98 | 9.83 |
| 弱凝胶 | 130.21 | 30.84 | 46.08 | 15.24 |
| 菌株发酵液 Jian 和弱凝胶的混合液 (体积比为 3∶1) | 131.93 | 28.88 | 51.38 | 22.50 |

3 结 论

(1) 通过对巴 19 断块弱凝胶和微生物联作方案进行室内研究发现芽孢杆菌 Chang 和 Jian 的原油降解率分别达到 160 mg/d 和 138 mg/d, 降黏率达到 50.5% 和 66.3%, 均具有乳化分散原油(原油乳化颗粒粒径分别为 38.22 μm 和 18.54 μm)、改善原油性质(芳香烃和胶质的相对含量分别降低了 11.9% 和 9.45%)、提高洗油效率(采收率分别提高了 9.53% 和 9.83%)的能力。

(2) 通过微生物和弱凝胶的配伍性实验发现, 菌株 Jian 对弱凝胶的成胶性能没有影响; 在弱凝胶调驱

的现场使用浓度范围内, Jian 的繁殖代谢、乳化分散(表面张力为 40.78 mN/m 和乳化原油平均粒径为 22.46 μm)、降黏(降黏率为 132 mg/d)和降解(降解率为 63.6%)能力也没有明显降低。说明菌株 Jian 与该弱凝胶具有良好的配伍性。

(3) 物理模拟实验结果可知, 弱凝胶调驱 + 微生物复合驱油能够继续提高微生物或弱凝胶驱的采收率, 提高弱凝胶驱采收率 7.26%, 提高微生物驱采收率 12.67%。因此弱凝胶与微生物菌液具有良好的配伍性, 具有技术联作的可操作性潜力, 可成为二次采油向三次采油的过渡技术。

参 考 文 献

[1] 巨登峰, 谷溢, 张双艳, 等. 弱凝胶与微生物调驱联作技术岩心试验研究[J]. 断块油气田, 2006, 13(4): 30-32.
Ju Dengfeng, Gu Yi, Zhang Shuangyan, et al. Core test of profile control and displacement by combining weak gel with microbe [J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2006, 13(4): 30-32.

[2] Lazar I, Petrisor I G, Yen T F. Microbial enhanced oil recovery (MEOR) [J]. Petroleum Science and Technology, 2007, 25(11): 1353-1366.

[3] Belyaev S S, Borzenkov I A, Nazina T N. Use of microorganisms in the biotechnology for the enhancement of oil recovery[J]. Microbiology, 2004, 73(5): 590-598.

- [4] Sen R. Biotechnology in petroleum recovery; the microbial EOR [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(6): 714-724.
- [5] 唐孝芬, 吴奇, 刘戈辉, 等. 区块整体弱凝胶调驱矿场试验及效果 [J]. 石油学报, 2003, 24(4): 58-61.
Tang Xiaofen, Wu Qi, Liu Gehui, et al. Field test on integral modifying and flooding project in regional reservoir with weak gel [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(4): 58-61.
- [6] Hajime K, Hideo K, Keita E. Analysis of methane production by microorganisms indigenous to a depleted oil reservoir for application in microbial enhanced oil recovery [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2012, 113(1): 84-87.
- [7] Dunsmore B C, Bass C J, Lappin-Scott H M. A novel approach to investigate biofilm accumulation and bacterial transport in porous matrices [J]. Environmental Microbiology, 2004, 6(2): 183-187.
- [8] Evans D B, Stepp A K, 韩培慧, 等. 微生物-三元复合驱提高采收率技术的探讨 [J]. 国外油田工程, 1999, 15(5): 5-7.
Evans D B, Stepp A K, Han Peihui, et al. The technology of microbial and Three Yuan compound drive to improve oil recovery [J]. Foreign Oilfield Engineering, 1999, 15(5): 5-7.
- [9] 赵福麟, 张贵才, 周洪涛, 等. 二次采油与三次采油的结合技术及其进展 [J]. 石油学报, 2001, 22(5): 38-42.
Zhao Fulin, Zhang Guicai, Zhou Hongtao, et al. The combination technique of secondary oil recovery with tertiary oil recovery and its progress [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(5): 38-42.
- [10] Liu Songyuan, Liang Shuang. Present research status and future trends of microbial enhanced oil recovery [M] // Zeng Dehuai. Applied Informatics and Communication, Communications in Computer and Information Science Volume 224. Berlin: Springer, 2011: 143-149.
- [11] 齐义彬, 曹美娜, 黄立信, 等. 嗜热解烃菌的组合降黏降解机理 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(24): 18-22.
Qi Yibin, Cao Meina, Huang Lixin, et al. Mechanism of crude oil viscosity reduction and degradation by thermophilic hydrocarbon-degrading bacteria Combination [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(24): 18-22.
- [12] 陈玉军, 巨登峰, 宋义伟, 等. 弱凝胶与微生物调驱联作技术的研究 [J]. 断块油气田, 2004, 11(6): 52-54.
Chen Yujun, Ju Dengfeng, Song Yiwei, et al. The research of the weak gel enhanced oil recovery cooperated with microbial enhanced oil recovery technic [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2004, 11(6): 52-54.
- [13] Li Guoqiang, Gao Peike, Wu Yunqiang, et al. Microbial abundance and community composition influence production performance in a low temperature petroleum reservoir [J]. Environmental Science and Technology, 2014, 48(9): 5336-5344.
- [14] Zheng Chenggang, He Jianglin, Wang Yongli, et al. Hydrocarbon degradation and bioemulsifier production by thermophilic *Geobacillus pallidus* strains [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(19): 9155-9161.
- [15] 国家发展和改革委员会. SY/T 5119-2008 岩石中可溶有机物及原油族组分分析 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
The national development and Reform Commission, SY/T 5119-2008 The soluble organic matter and oil component analysis in the rock [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [16] 高配科, 王燕森, 张宏祚, 等. 两株嗜热解烃菌对原油的降黏机制 [J]. 化工学报, 2013, 64(11): 4240-4245.
Gao Peike, Wang Yansen, Zhang Hongzuo, et al. Mechanism of crude oil viscosity reduction by two thermophilic hydrocarbon-degrading bacteria [J]. CIESC Journal, 2013, 64(11): 4240-4245.
- [17] Kikuchi T, Hasumi K. Enhancement of reciprocal activation of prourokinase and plasminogen by the bacterial lipopeptide surfactants and iturin Cs [J]. The Journal of Antibiotics, 2003, 56(1): 34-37.
- [18] 杨世忠, 牟伯中, 吕应年, 等. 环脂肽氨基酸顺序的质谱测定 [J]. 化学学报, 2004, 62(21): 2200-2204.
Yang Shizhong, Mou Bozhong, Lü Yingnian, et al. MS Determination of the sequence of amino acids in a cyclic lipopeptide [J]. Acta Chimica Sinica, 2004, 62(21): 2200-2204.
- [19] 梁欢, 田松柏, 祝馨怡, 等. 高效液相色谱-蒸发光散射检测器法快速测定脱沥青质膏压渣油族组成 [J]. 石油学报: 石油加工, 2011, 27(4): 634-637.
Liang Huan, Tian Songbai, Zhu Xinyi, et al. The quick characterization for group composition of deasphalted residue oil by high performance liquid chromatography with evaporative light scattering detector [J]. Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section, 2011, 27(4): 634-637.
- [20] 赖波, 周岳溪, 李志军, 等. BAC-SBR 反应器降解 ABS 树脂生产凝聚干燥工段废水中特征污染物 [J]. 石油学报: 石油加工, 2011, 27(6): 984-988.
Lai Bo, Zhou Yuexi, Li Zhijun, et al. Degradation of typical pollutants from coagulation and desiccation section wastewater of ABS resin manufacture by BAC-SBR reactor [J]. Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section, 2011, 27(6): 984-988.
- [21] 齐义彬, 王大威, 吴萌萌, 等. 胶质降解和生物乳化在稠油降黏中的作用 [J]. 石油学报, 2012, 33(4): 670-675.
Qi Yibin, Wang Dawei, Wu Mengmeng, et al. Effects of resin degradation and biological emulsification on the viscosity break of heavy oils [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 670-675.
- [22] 康宏, 赵淑娟, 李玥, 等. 两株细菌的特性及物理模拟驱油试验 [J]. 油田化学, 2013, 20(2): 240-242.
Kang Hong, Zhao Shujuan, Li Yue, et al. Characteristics of two strains of bacteria and physical simulation flooding experiments [J]. Oilfield Chemistry, 2013, 20(2): 240-242.
- [23] 李光辉, 张贵才, 葛际江, 等. 阳离子微球与部分水解聚丙烯酰胺的絮凝作用 [J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1157-1162.
Li Guanghui, Zhang Guicai, Ge Jijiang, et al. Coagulation effect of cationic microspheres with residual hydrolyzed polyacrylamide [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1157-1162.
- [24] 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.
- [25] 张继成, 姜振海, 林立, 等. 聚合物驱油田可采储量计算方法 [J]. 石油学报, 2014, 35(4): 725-732.
Zhang Jicheng, Jiang Zhenhai, Lin Li, et al. Calculation method of recoverable reserves in polymer flooding field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 725-732.